

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Vliv molekul vody na útlum optických vláken z PDMS
Influence of the water molecules on attenuation of optical fibres
prepared from PDMS**

Zadání bakalářské práce

Student:

Václav Sekret

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Vliv molekul vody na útlum optických vláken z PDMS
Influence of the water molecules on attenuation of optical fibers prepared
from PDMS

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

PDMS je dnes jedním z nejperspektivnějších polymerových materiálů pro výrobu fotonických prvků. Protože OH ionty do něj poměrně rychle difundují, mění se jeho optické vlastnosti. Diplomová práce je zaměřena na studium jejich změn. Proto v diplomové práci splňte tyto cíle:

1. Realizujte krátké úseky optických vláken z PDMS.
2. Změřte útlum vláken z PDMS pro vybrané vlnové délky.
3. Zatěžujte vyrobená vlákna ponořením do vodní lázně v různých intervalech a různých teplotách.
4. Změřte útlum optických vláken po zátěži vodní lázni pro vybrané vlnové délky.
5. Porovnejte chování vláken z PDMS bez zátěže a po zátěži vodní lázni.

Seznam doporučené odborné literatury:

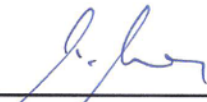
[1] Katalogové listy PDMS výrobce Dow Corning
Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry

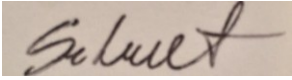



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *26. dubna 2017*

A rectangular area containing a handwritten signature in dark ink. The signature is stylized and appears to be 'S. L. ...'.

.....
podpis studenta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu prof. RNDr. Vladimíru Vašinkovi, CSc za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce. Taktéž patří mé díky panu Ing. Ondřeji Zbořilovi za cenné rady.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem molekul vody na útlum optických vláken z polydimethylsiloxanu.

Součástí práce je popis základních vlastností optických vláken, výroby vláken z PDMS a měření jejich útlumu při různých vlnových délkách, kdy jsou vlákna v různých časových intervalech a při různých teplotách vody ponořena do vodní lázně. V práci jsou uvedeny výsledky jednotlivých měření, která jsou měřena metodou dvou délek. Za pomoci stavebnice ThorLabs a LED zdrojů byla provedena veškerá měření.

Klíčová slova

PDMS, útlum, vlnová délka, optické vlákno, měření.

Abstract

This thesis deals with the influence of the water molecules on attenuation of optical fibres prepared from polydimethylsiloxane.

The work deals with production of the fibres from polydimethylsiloxane and it is measurement of the attenuation when the fibres are immersed into water bath in different time intervals and different water temperatures.

The work contains results of each measurement which are measured by method of two lengths. ThorLabs kit and LED sources have been used for all measurements.

Key words

PDMS, attenuation, wave length, optical fibre, measurement

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	1
Seznam použitých zkratk.....	2
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	3
Úvod.....	5
1 Základní pojmy	- 6 -
1.1 Světlo	- 6 -
1.1.1 Co je to světlo?.....	- 6 -
1.1.2 Vlnová délka světla.....	- 7 -
1.2 Index lomu	- 8 -
1.3 Fermatův princip	- 8 -
1.4 Snellův zákon.....	- 8 -
1.5 Úplný odraz.....	- 10 -
1.6 Numerická apertura.....	- 10 -
1.7 Normalizovaná frekvence	- 10 -
2 Optická vlákna	- 11 -
2.1 Stručná historie	- 11 -
2.2 Rozdělení optických vláken	- 12 -
2.2.1 Vidovost optických vláken.....	- 12 -
2.2.2 Mnohovidová vlákna.....	- 12 -
2.2.3 Vlákná se skokovou změnou indexu lomu.....	- 14 -
2.2.4 Jednovidová vlákna.....	- 14 -
2.3 Výroba optických vláken	- 15 -
2.3.1 Výroba preformy.....	- 15 -
2.3.2 Metoda tažení vlákna	- 17 -
2.3.3 Výroba pomocí dvojitého kelímku.....	- 17 -
2.4 Útlum v optických vláknech	- 18 -
2.4.1 Ohybové ztráty	- 19 -
2.4.2 Rozptylové ztráty	- 19 -
2.4.3 Absorpční ztráty.....	- 20 -
3 Metody měření útlumu.....	- 21 -

3.1	Metoda dvou délek.....	- 21 -
3.2	Metoda vložených ztrát.....	- 22 -
3.3	Metoda zpětného rozptylu.....	- 23 -
4	Polydimethylsiloxan	- 24 -
4.1	Sylgard	- 24 -
4.1.1	Sylgard 170	- 25 -
4.1.2	Sylgard 517	- 25 -
4.1.3	Sylgard 182 a 184	- 25 -
5	Výroba vzorků z PDMS.....	- 26 -
5.1	Příprava směsi	- 26 -
5.2	Tvorba vzorků z PDMS	- 27 -
6	Měřicí pracoviště	- 33 -
6.1	Model THORLABS	- 33 -
6.2	Použité elektronické prvky.....	- 34 -
6.3	Použité zdroje elektromagnetického záření	- 35 -
7	Praktické měření	- 36 -
7.1	Metodika měření	- 36 -
7.2	Zpracování výsledků a výpočtů	- 37 -
7.3	Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorek před zátěží	- 38 -
7.4	Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorky zatěžované vodní lázní	- 40 -
7.5	Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorky zatěžované vodní lázní o teplotě 55°C	- 42 -
7.6	Porovnání chování vláken z PDMS před a po zátěži	- 45 -
	Závěr	- 46 -
	Použitá literatura	48
	Seznam příloh.....	- 49 -

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
A	dB	Útlum
T	s	Perioda
V	-	Normalizovaná frekvence
NA	-	Numerická apertura
λ	nm	Vlnová délka
a	$\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$	Měrný útlum
t	°C	Teplota
P_{výst}	W	Výstupní výkon
P_{vst}	W	Vstupní výkon

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
PDMS	Polydimethylsiloxan
IEC	International Electrotechnical Commission
OVD	Outside vapour deposition
VAD	Vapor axial deposition
MCVD	Modified chemical vapour deposition
PCVD	Plasma-activated chemical vapour deposition
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Elektromagnetické spektrum	6
1.2	Různé pohledy na světlo	7
1.3	Znázornění vlnové délky	8
1.4	Zákon lomu ke kolmici a zákon lomu od kolmice	9
1.5	Zákon odrazu	9
2.1	Trajektorie paprsku světla v závislosti na indexu lomu	12
2.2	Mnohovidové vlákno– se skokovou změnou indx. lomu	13
2.3	Mnohovidové vlákno – s gradientním indexem lomu	15
2.4	Jednovidové vlákno SM (Single mode)	15
2.5	Preforma optického vlákna	18
2.6	Druhy útlumů optických vláken a) makroohyb, b) mikroohyb	19
3.1	Postup měření útlumu metodou dvou délek	21
3.2	Postup měření útlumu metodou vložených ztrát	22
3.3	Postup měření útlumu metodou zpětného rozptylu	23
4.1	Chemické složení polydimethylsiloxanu	24
5.1	Sylgard a vytvrzovací činidlo	26
5.2	Vlevo – promíchaná směs se vzduchovými bublinkami, vpravo – odstátá směs po 3 hodinách	27
5.3	Narovnání silikonových hadiček	28
5.4	Ucpání spodní části hadiček	29
5.5	Všech 24 vzorků z PDMS po zapečení	30
5.6	Vzorek ve formě	30
5.7	Vzorek po nařiznutí formy	31
5.8	Finální vzorek z PDMS	31
5.9	Špatně vyrobený vzorek se vzduchovými bublinami	32
6.1	Měřicí pracoviště THORLABS	33
6.2	Zatměné měřicí pracoviště	34

7.1	Měření pro nezkrácený vzorek o délce 10 cm	36
7.2	Měření pro zkrácený vzorek o délce 1 cm	37
7.3	Spektrální závislost útlumu nezatíženého vzorku	39
7.4	Vzorek zatěžován vodní lázni	40
7.5	Graf zobrazující útlum v závislosti na intervalu zátěže ve vodní lázni	41
7.6	Spektrální závislost útlumu po 60 minutách	42
7.7	Zatěžování vlákna vodou o teplotě 55°C	43
7.8	Graf zobrazující útlum v závislosti na teplotě vody	43
7.9	Spektrální závislost po 60 minutách ve vodě o teplotě 55°C	44

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
1.1	Seznam použitých LED diod	35
1.2	Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorek před zátěží	38
1.3	Porovnání naměřených hodnot před a po zátěží vodní lázni	45
1.4	Porovnání naměřených hodnot před a po zátěží vodní lázni o teplotě 55°C	45

Úvod

V dnešní době, se čím dál tím více začíná využívat optických komunikací, ve kterých neustále dochází k inovacím. A právě jednou inovací se zabývá právě tato bakalářská práce. Kdy PDMS je dnes jedním z nejperspektivnějších polymerových materiálů pro výrobu fotonických prvků.

V úvodu práce jsou popsány klíčové pojmy, které jsou úzce spojené s optoelektronikou resp. touto bakalářskou prací. Jedná se o popis světla a jeho vlastností, vlnové délky, indexu lomu, fermatův princip a dalších důležitých pojmů, které se využívají v optoelektronice. V další kapitole je popsáno optické vlákno, jeho rozdělení, výroba a ztrátovost. V třetí kapitole je uveden postup měření útlumu v optických vláknech. V druhé části této bakalářské práce se nachází kapitola, která popisuje materiál, který byl použit při výrobě vzorků a to polydimethylsiloxan. Předposlední kapitola se zabývá samostatnou výrobou vzorků z PDMS. Další kapitola popisuje měřicí pracoviště, které bylo speciálně sestaveno pro tuto bakalářskou práci. Poslední část je částí s názvem „Praktické měření“, kde můžeme nalézt popis postupu měření vzorků a zpracované výsledky měření.

V závěru práce jsou porovnány jednotlivá měření v závislosti na časovém intervalu a teploty vody v lázni.

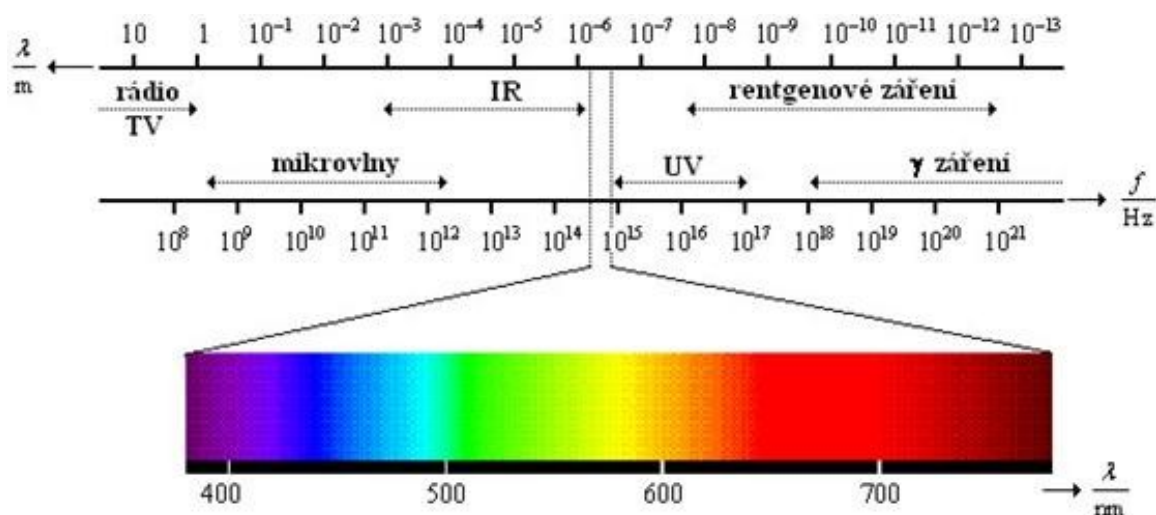
1 Základní pojmy

1.1 Světlo

1.1.1 Co je to světlo?

Původní základní představy o světle se kladou do 17. století, kdy došlo k vzniku dvou představ o světle. První představou byla Newtonova částicová teorie a druhou byla vlnová teorie Hooka a Huygense, přičemž tato teorie byla podpořena propracovaným pozorováním Younga, Maluse, Eulera, aj. Roku 1864 došlo k uspořádání Maxwellových rovnic do obecného tvaru, ze kterých vyplývá existence příčných elektromagnetických vln. Zároveň z těchto rovnic vyplynula také rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu, která je 299792458 m/s.

Skotský fyzik Maxwell navrhl, aby světlo bylo vnímáno jako elektromagnetické vlny, které se šíří rychlostí $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ a frekvencí $f \approx 10^{14} \text{ Hz}$, která odpovídá vlnové délce okolo 500 nm. Viditelná část spektra magnetického vlnění odpovídá vlnovým délkám od 380 nm do 780 nm. Do světla v optických komunikacích obvykle zahrnujeme i část spektra, kterou samotným okem nejsme schopni zachytit. [1]



Obrázek 1.1: Elektromagnetické spektrum[5]

Světlo obecně můžeme popsat mnoha způsoby, avšak záleží, jaké jevy zrovna potřebujeme popsat. Nejstarším způsobem popisu je popis geometrický, kde světlo chápeme jako paprsky, které se šíří od zdroje v homogenním prostředí přímočaře.

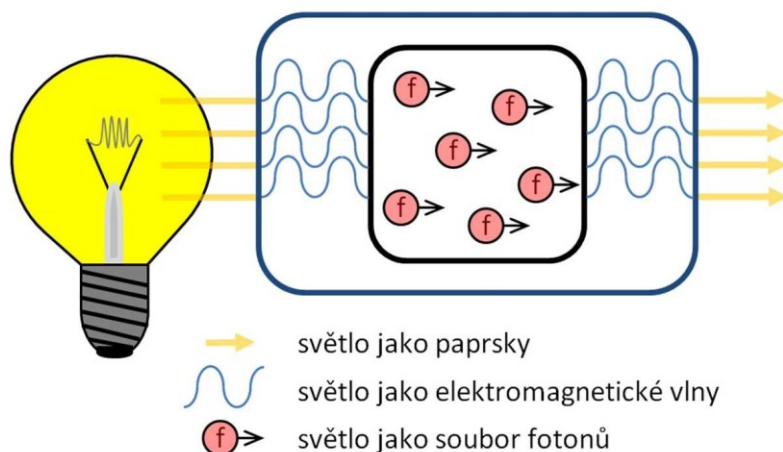
Vývojově nejmladším popisem je kvantový popis, kde světlo chápeme jako proud částic – fotonů.

Světlo lze popsat třemi způsoby:

Geometrický - světlo chápeme jako paprsky, které se šíří od zdroje všemi směry v homogenním prostředí přímočaře.

Vlnový – světlo se šíří v podobě elektromagnetických vln a ty jsou popsány Maxwellovými rovnicemi,

Kvantový – světlo se šíří ve formě energetických částic – fotonů. [1][2]



Obrázek 1.2: Různé pohledy na světlo[10]

1.1.2 Vlnová délka světla

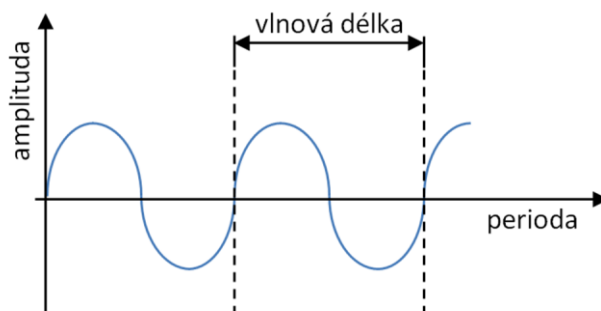
Jak už jsme si v předešlé kapitole řekli, tak elektromagnetické vlnění je popsáno Maxwellovými rovnicemi. Z těchto rovnic můžeme chápat, že elektrická a magnetická složka elektromagnetického vlnění jsou ve vzájemně kolmých směrech a které jsou kolmé ve směru šíření vlnění. Ke charakterizaci vlnění můžeme použít frekvenci f , která je převrácenou hodnotou délky jedné periody kmitání, popsána vzorcem

$$T = 1/f. \quad (1.1)$$

Vlnovou délkou λ , chápeme jako vzdálenost, kterou urazí světlo během jedné periody T ve vakuu. Vlnovou délku můžeme popsat vzorcem

$$\lambda = c \cdot T = c/f. \quad (1.2)$$

Kde c značí rychlost světla, f frekvenci a T periodu. [1][2]



Obrázek 1.3: Zázornění vlnové délky[10]

1.2 Index lomu

Jak již z předešlých kapitol víme, tak světlo je šířeno konečnou rychlostí, která ve vakuu je $c = 299792458$ m/s. Avšak v závislosti na prostředí se šíří rychlostí v , která je nižší a poměr těchto rychlostí právě nazýváme index lomu, který je popsán vzorcem

$$n = c/v \quad (1.3)$$

Z tohoto poměru můžeme usoudit, že index lomu je vždy větší nebo roven 1 (index lomu vakua). Jestliže se představíme dvě různá prostředí z pohledu indexu lomu, tak prostředí, ve kterém se světlo šíří pomaleji nazýváme prostředím opticky hustším, zatímco prostředí, ve kterém se světlo šíří rychleji je prostředím opticky řidším. Důležité je podotknout, že index lomu není konstanta. V praxi se můžeme nejčastěji setkat s materiály jako je vzduch, který má index lomu nepatrně vyšší než je hodnota 1, voda, která má index lomu 1.33 a nebo sklo, charakterizováno s indexy lomu 1,5 – 1,6. [1][2]

1.3 Fermatův princip

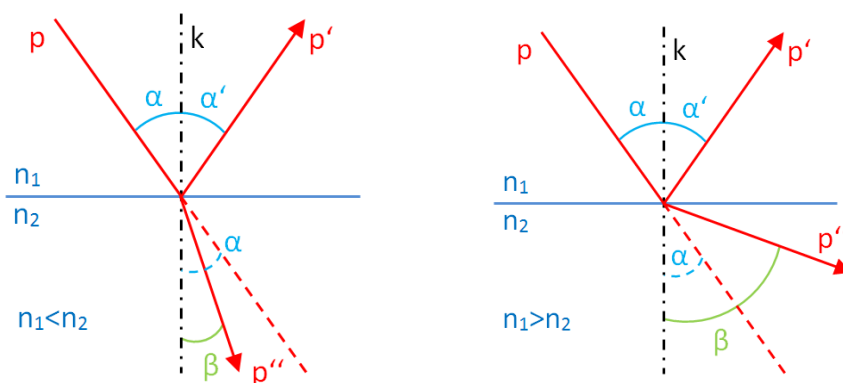
Pro šíření světla platí Fermatův princip, který popisuje základní jevy geometrického popisu světla a tento princip říká: „Světlo se v prostoru šíří z jednoho bodu do druhého po takové dráze, aby čas potřebný k proběhnutí této dráhy nabýval minimální (extrémní) hodnoty.“

1.4 Snellův zákon

Následující vztahy byly popsány nizozemským matematikem a astronomem Willebrordem Snelliusem. Jestliže paprsek (světlo) se šíří prostředím, které není homogenní a prostředími, které mají různé indexy lomu, pak dochází k odrazu a lomu světla. Lom světla je popsán rovnicí

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.4)$$

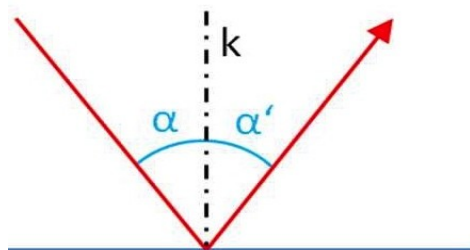
Snellův zákon lomu nám říká, že při přechodu světla z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího nastává lom světla ke kolmici vzhledem k rozhraní prostředí. Zatímco při přechodu světla z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího nastává lom od kolmice vzhledem k rozhraní prostředí. Na obrázku 1.3 jsou tyto případy naznačeny.



Obrázek 1.4: Zákon lomu, ke kolmici (vlevo), zákon lomu od kolmice (vpravo)[10]

Na obrázku 1.4 můžeme vidět zákon odrazu. Pro odraz světla platí rovnice, (1.5) ze které plyne, že velikost úhlu odrazu se rovná velikost úhlu dopadu.

$$\alpha = \alpha' \quad (1.5)$$



Obrázek 1.5: Zákon odraz[10]

1.5 Úplný odraz

Jak z předešlých obrázků můžeme vypožorovat, tak odraz a lom světla nenastává vždy současně. Jestliže jsou splněny určité podmínky, dochází k totálnímu odrazu na rozhraní dvou optických prostředí. První podmínka je splněna, jestliže světlo (paprsek) dopadá z prostředí opticky hustšího, které má index lomu n_1 , do prostředí opticky řidšího, které má index lomu n_2 . Z čehož vyplývá vztah

$$n_1 > n_2 \quad (1.6)$$

A druhá podmínka je splněna, když je dopadový úhel větší, než tzv. mezní úhel dopadu. Při splnění těchto dvou podmínek nastane úplný odraz. Právě na principu úplného odrazu je založen přenos světla optickými vlákny. [1][2]

1.6 Numerická apertura

Numerická apertura úzce souvisí se Snellovým zákonem, který platí na rozhraní jádra a pláště. Určuje, zda je vlákno schopno navázat světlo resp. úhel, pod kterým je světlo na výstupu vlákna vyvozováno. Jestliže úhel dopadu vyhovuje velikosti, tak dojde k totálnímu odrazu světla zpět do jádra. Což je právě případ, který požadujeme. Ale jestliže je úhel příliš malý, tak dojde k průchodu světla do pláště, přičemž přicházíme o část vyzařovaného výkonu. Numerickou aperturu můžeme popsat vzorcem

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.7)$$

1.7 Normalizovaná frekvence

Jedná se o bezrozměrný parametr, jenž nám dává do souvislosti jak už geometrické vlastnosti jádra vlákna, materiálové vlastnosti, tak vlnovou délku světla, jenž jsme použili. Platí tedy

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{\lambda} \quad (1.8)$$

Kde π je Ludolfovo číslo $\pi = 3,14159$, d značí průměr jádra vlákna, NA je numerická apertura a λ je vlnová délka záření.[1][2]

2 Optická vlákna

Optické vlákno je válcový dielektrický vlnovod, ve kterém se světlo šíří za pomoci úplného (totálního) vnitřního odrazu. Což znamená, že světlo se odráží od rozhraní optického prostředí jádra a pláště. Optické vlákna jsou nejčastěji zhotovena z křemenného skla, které je obohaceno o dopanty, které ovlivňují přesnou hodnotu indexu lomu, jako jsou germanium nebo titan. Tyto materiály jsou vysoce kvalitní. Jak už bylo dříve zmíněno, optické vlákno se skládá z jádra, které vede paprsek a pláště, které zajišťuje, aby nedocházelo k úniku záření z vlnovodu. V sítích na velké vzdálenosti a s vysokými přenosovými rychlostmi spíše použijeme vlákna skleněná, ale v lokálních sítích můžeme namísto skleněných vláken použít vlákna plastová.

Vlnové délky pro lokální počítačové sítě jsou 650 nm pro polymerová vlákna a 850 nm pro skleněná vlákna. V páteřních sítích se využívá pro přenos informací vlnová délka 1 310 nm a 1 550 nm.

Jedním z důvodů využití optických vláken je dosažení větších přenosových rychlostí.

2.1 Stručná historie

Pod pojmem optické vlákno si obecně můžeme představit skleněné nebo plastové tyčinky, které je možné natáhnout a jsou velice přizpůsobivé. Začátkem 19. století skláři našli metodu jak vyrobit delší a odolnější vlákna a to pomocí metody tažení roztaveného skla.

V roce 1960, kdy byl vynalezen laser se vývoj zaměřoval jednak na zdokonalení laseru, ale také se začaly hledat metody jak přenášet světelné paprsky s co nejmenšími ztrátami, jelikož v té době vlnovody dosahovaly vysokých útlumů. A bylo prokázáno, že vlákno, které je složeno z jádra a obalu dosahuje mnohonásobně nižších útlumů.

Na počátku roku 1970 byla vyrobena jednomódová vlákna firmou Corning. Vývoj se dále zaměřil i na vlákna multimódová, která se ale pro vyšší přenosové rychlosti a větší vzdálenosti moc neosvědčila a proto se vývoj více zaměřil na vylepšení jednomódových vláken. Postupem času se snižoval útlum, zatímco délka vlnových délek se zvyšovala.

Zásadním zvýšením rychlosti umožnil přechod na vlnovou délku 1550 nm, kde se ukázalo, že křemenné vlákno má minimální útlum. Což v praxi vedlo ke konstrukci rozsáhlejších sítí.

V dnešní době je možné na jedné vlnové délce přenášet až 100Gbit/s a vlnové multiplexy obsahují 256 a více vlnových délek, které mají rozestup menší než 0,4 nm. V sítích LAN, kde jsou požadavky na vysoké rychlosti, ale nízkou cenu a zároveň se jedná o lokální sítě, tudíž není potřeba velké vzdálenosti, našly uplatnění plastová vlákna. Která jsou známa pro svou flexibilitu a hlavně nízké pořizovací náklady.

Jak můžeme s postupem času pozorovat, tak se inovace stále snaží posouvat v optických komunikacích k vyšším vlnovým délkám. Taktéž už křemenná vlákna jsou nedostačující a přechází se k novým materiálům, např. fluoridová a flintová skla. [10]

2.2 Rozdělení optických vláken

Optická vlákna rozdělujeme do dvou základních skupin. Na mnohovidová a jednovidová vlákna. Detailnější třídění vláken je dále založeno na jejich geometrických rozměrech a přenosových parametrech. Taktéž jsou v optických komunikacích využívána speciální optická vlákna.

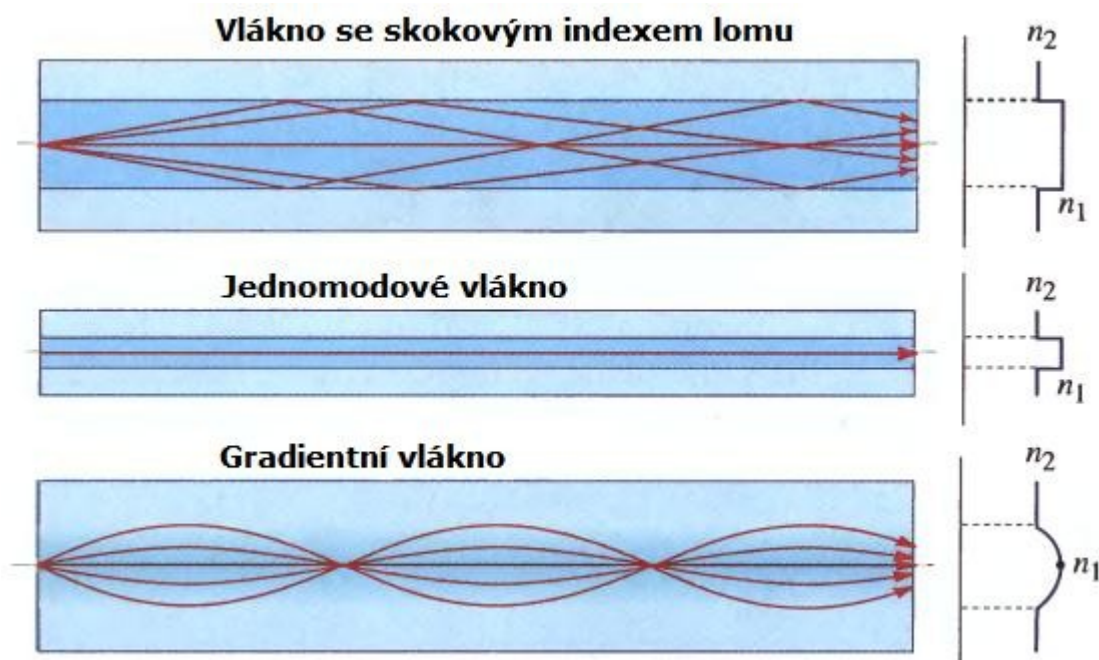
Ale v této kapitole se budeme věnovat pouze obecnému rozdělení optických vláken. Za standardizací optických vláken stojí Mezinárodní elektrotechnická komise (International Electrotechnical Commission – IEC)

2.2.1 Vidovost optických vláken

Dle vlnové analýzy můžeme ukázat, že optickým vláknem se šíří tzv. vidy elektromagnetického pole. „Každý vid je charakterizován určitým příčným rozložením elektromagnetického pole ve vlákně a fázovou konstantou šíření.“ [3]

2.2.2 Mnohovidová vlákna

Mezi základní přenosové parametry mnohovidových vláken patří jejich útlum, přenosová šířka pásma a jejich numerická apertura. A právě na numerické apertuře a přenosové šířce pásma je závislý průběh profilu indexu lomu. Právě proto dále dělíme mnohovidová vlákna na vlákna se skokovou změnou indexu lomu a na tzv. vlákna gradientní. Paprsky se v těchto gradientních vláknech nešíří na základě totálního odrazu, ale šíří se po zakřivených spirálových drahách. Výroba gradientních vláken je mnohem náročnější, ale za to dostaneme menší vidovou disperzi a tím větší přenosovou šířku pásma. Menší vidové disperze můžeme dosáhnout tím, že světelné paprsky s delší dráhou se šíří větší rychlostí a kratší světelné paprsky se šíří menší rychlostí.[3]

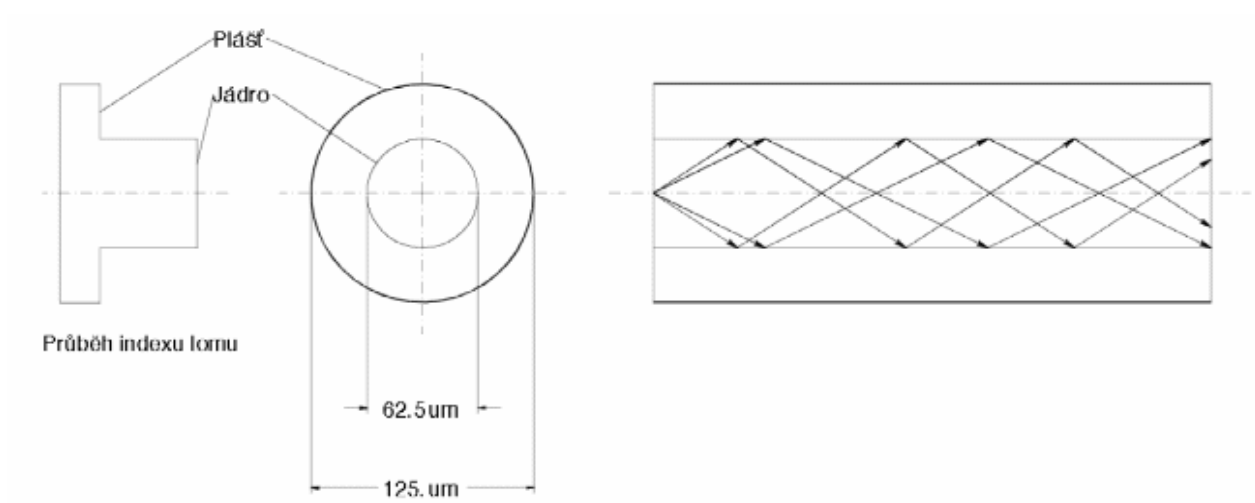


Obrázek 2.1: Trajektorie paprsku světla v závislosti na indexu lomu

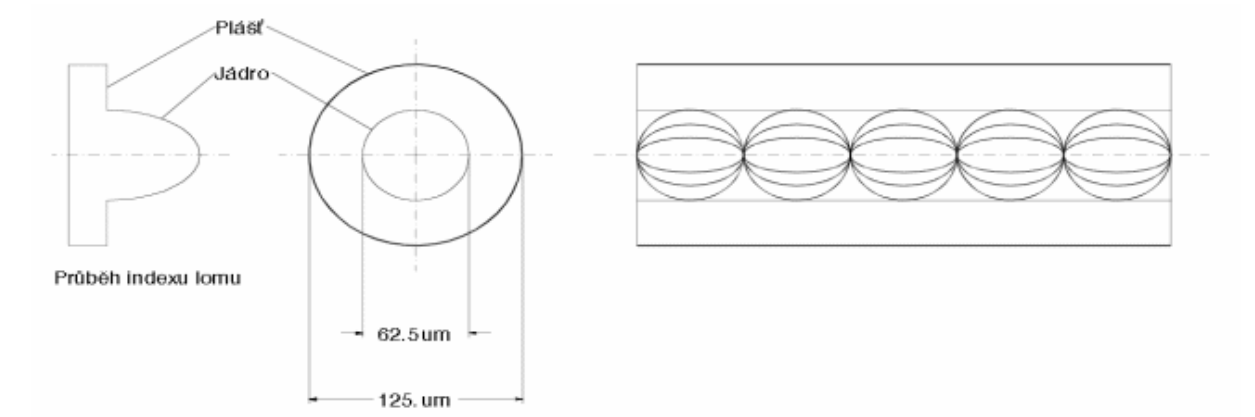
Jestliže zvolíme vhodný profil indexu lomu, tak můžeme dosáhnout maximální přenosové šířky pásma pouze v oblasti 850 nm a nebo pouze v oblasti 1 300 nm, případně na vlnové délce 1 550 nm.

Už z názvu nám je jasné, že mnohavidové vlákna šíří několik vidů vlákna v závislosti na šířce jádra. Hodnota počtu vidů může být až v řádech tisíců.

Nevýhodou mnohovidových vláken je, že při šíření vidů se informace přenáší vláknem po drahách různých délek a právě proto, že na konci vlákna dochází k vyhodnocování součtu všech vidů, které procházejí vláknem, dochází ke zkreslení, které se nazývá vidová disperze.[3]



2.2: Mnohovidové vlákno – se skokovou změnou indexu lomu



2.2: Mnohovidové vlákno – s gradientním indexem lomu

2.2.3 Vlákná se skokovou změnou indexu lomu

Jedná se o válcově symetrickou strukturu, která je zhotovena ze dvou materiálů, které mají různé indexy lomu. Obvyklé hodnoty indexu lomu jádra jsou v rozmezí 1,46 – 1,48. Zato hodnoty indexu lomu pláště jsou nepatrně menší. K tomu se vztahuje tzv. relativní index lomu popsán vztahem

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (1.8)$$

kde n_1 je index lomu jádra a n_2 je index lomu pláště.

Jestliže platí, že $\Delta \ll 1$, tak se jedná o slabě vedoucí vlákno, kde jsou světelné paprsky skoro rovnoběžné s osou daného vlákna. Obvykle hodnota Δ leží v rozmezí od 0,001 do 0,02. Jestliže vlákna mají větší hodnotu Δ , tak obvykle mají vysokou numerickou aperturu, což umožňuje navázání většího počtu vidů (módů). Ale nevýhodou je, že s rostoucí Δ roste i módová disperze, s kterou se nám zvyšuje zkreslení daného signálu.

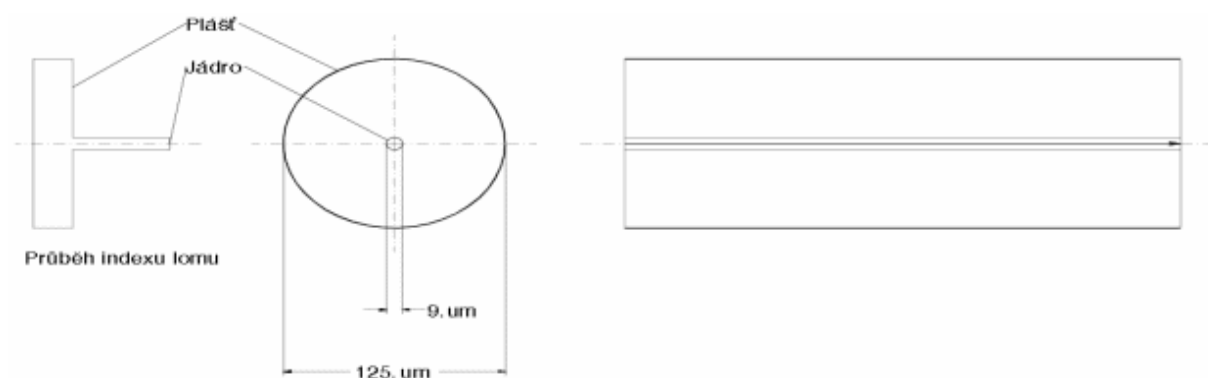
2.2.4 Jednovidová vlákna

Již z názvu můžeme chápat, že jednovidová vlákna v sobě šíří pouze jeden vid optického záření. Materiál je opět křemenné sklo. Dalším specifikem je, jestliže platí, že normalizovaná frekvence $V < 2,405$, tak se jedná o jednovidové vlákno. Specifickým parametrem těchto vláken je velice malý průměr jádra (menší než $10 \mu\text{m}$) a malá numerická apertura NA ($\approx 0,1$). Malá velikost jádra ovlivňuje paprsek, který se šíří podél osy. Tato vlastnost potlačuje módovou disperzi. Obvykle používaná hodnota průměru jádra je $d = 8 - 9 \mu\text{m}$ při vlnové délce $\lambda = 1\,310 - 1\,550 \text{ nm}$.

Mezi nevýhody patří velké množství energie, které je vedeno pláštěm. A právě kvůli této nevýhodě musí být plášť dostatečně široký, aby pokryl vlnu, která vzniká na hranici prostředí. Dále jsou tyto vlákna více náchylná na malé ohyby vzniklé při instalaci a provozu a mikroohyby, které vznikají při výrobě. Díky tomuto problému jsou vyvinuty zvláštní průběhy indexu lomu, které se starají o to, aby se paprsek vedený jádrem nevyvazoval. Díky malým rozměrům jednovidového vlákna je obtížné do něho navázat světlo a taktéž bude složitější spojování vláken.

Výhodou je vysoká šířka pásma, nízká cena i kvalita.

Jak už bylo více zmíněno, pro jednovidové vlákno musí platit $V < 2,405$ a to můžeme v podstatě zajistit třemi parametry: zmenšením průměru jádra, snížením numerické apertury, použitím vyšší vlnové délky.[3]



2.3: Jednovídné vlákno SM (Single mode)

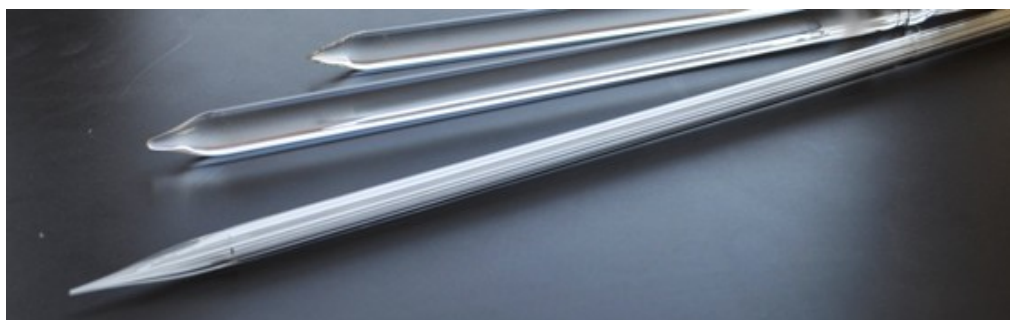
2.3 Výroba optických vláken

Pro výrobu optického vlákna se používají sklovité struktury a plastové jedнокrystalové materiály, které jsou dotovány právě k tomu, aby bylo možné upravit index lomu. Prvním krokem je příprava vysoce kvalitního prášku, který je umístěn do platinového kelímku, který je následně zahřát vysokofrekvenčním indukčním ohřevem na teplotu v rozmezí $900 - 1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

V následujícím kroku touto horkou tekutinou probublává vysoušecí plyn, který na sebe váže OH^- ionty.

Výroba jednovídných a gradientních mnohovídných optických vláken je složena ze dvou výrobních postupů. Prvním krokem je nalití horké tekutiny do tvaru skleněné válcové tyčinky, které nazýváme preformy a ty jsou dále použity k výrobě optických vláken. Délka těchto vláken se pohybuje od 30 cm až do několika metrů.

2.3.1 Výroba preformy



Obrázek 2.4: Preforma optického vlákna

2.3.1.1 Klasická technologie

Tato technologie může být známá pod názvem „tyčka v trubce“. Jedná se o velice jednoduchou technologii tažení vlákna, která ovšem umožňuje výrobu pouze vlákna se skokovým indexem lomu. Preforma je složena z vnitřní části, kterou tvoří válec o indexu lomu jádra a z vnější části, kterou tvoří dutá trubice o indexu lomu pláště. Válec je umístěn do duté trubice a celá tato preforma se nechá zapéct. Jedná se o levou technologii, kterou jsem uplatnil při výrobě vláken z PDMS pro tuto bakalářskou práci.[1]

2.3.1.2 Technologie OVD (Outside vapour deposition)

Principem výroby pomocí této technologie je horizontální nanášení topného plynu (vodík nebo metan), který je obohacen o chlorid křemičitý na nosný prvek, který je otáčen kolem své osy. Poté je preforma umístěna do pece, kde se nachází vysoušecí plyn, který na sebe váže OH^- ionty. OVD je jednou z nejvhodnějších metod pro výrobu mnohovidových gradientních vláken s větší délkou (desítky kilometrů).[1]

2.3.1.3 Technologie VAD (Vapour axial deposition)

Touto technologií je nám umožněna výroba téměř jakéhokoliv profilu indexu lomu. Preforma je vytvářena nanášením skloviny na konec vlákna. Poté je umístěna do komory, která je naplněna vysoušecím plynem, který na sebe váže OH^- ionty. V další fázi je preforma umístěna do pece, kde dojde ke spojení jednotlivých vrstev.[1][3]

2.3.1.4 Technologie MCVD (Modified chemical vapour deposition)

Metoda MCVD patří mezi moderní technologie pro výrobu optických vláken. Jedná se o technologii, při které se do rotující tyče vpustí chemický plyn, který se postupně usazuje na rozpáleném skelném povrchu. Plyn je pomalu usazován a postupně se vytváří vyžadovaný index lomu. Tento proces zabere řádově jednotky hodin a po jeho dokončení je duté vlákno uloženo do pece, kde se smrští.[3]

2.3.1.5 Technologie PCVD (Plasma-activated chemical vapour deposition)

Při použití této technologie se do skelné tyčinky vpustí dopovaný plyn, který se usazuje pouze na místě, kde je zvýšená teplota. Tato metoda je velice přesná, ale vysoce nákladná a časově náročná.

2.3.2 Metoda tažení vlákna

Při tomto procesu nám pomáhá zemská gravitace, kdy preforma je uchycena ve svislém směru a konec preformy je zahřát laserem na teplotu 2 000 °C. Díky tomu se skelný materiál stane tekutým a začnou se tvořit kapky, které když se odkápnou, tak táhnou za sebou vlákno. Rychlost tažení vlákna se pohybuje ve stovkách až tisících metrech za sekundu. Poté je vlákno zkontrolováno a je na něj umístěna sekundární ochrana.[1]

2.3.3 Výroba pomocí dvojitého kelímku

Principem této metody je použití dvou kelímků. Kde v každém z nich se nachází materiál o různém indexu lomu. Na konec předeřátého kelímku je nasměrován laser, který reguluje teplotu tudíž i rychlost tažení vláken. Pomocí této metody jsme schopni vyrobit velice dlouhá vlákna.

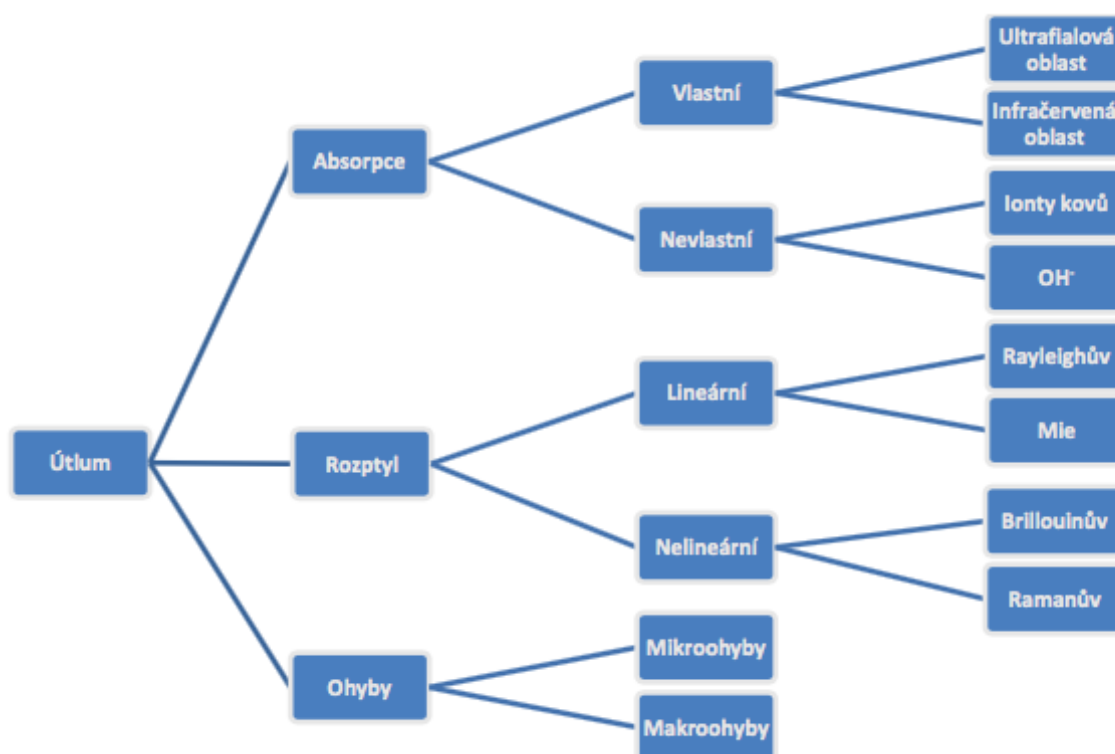
2.4 Útlum v optických vláknech

Jakékoliv nečistoty, příměsi, rozptyl, nadměrný ohyb vlákna nebo disperze, způsobují útlumy/ztráty, které zmenšují přenosové kapacity tras. Útlum optického vlákna je definován vzorcem

$$A = 10 \log \left(\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} \right) \quad (1.9)$$

P_{in} je navázaný výkon. Výkon, který můžeme změřit na konci optického vlákna je značen P_{out} . Podíl $P_{\text{in}}/P_{\text{out}}$ můžeme nazývat jako ztráty optického vlákna. Jedná se o logaritmickou funkci, což znamená, že hodnota -3dB odpovídá 50% ztrát výkonu.

Útlum patří mezi základní parametry každého vlákna nebo přenosových tras. Právě velikost útlumu nám udává, jak dlouho trasu budeme schopni za pomoci určitých prostředků realizovat.



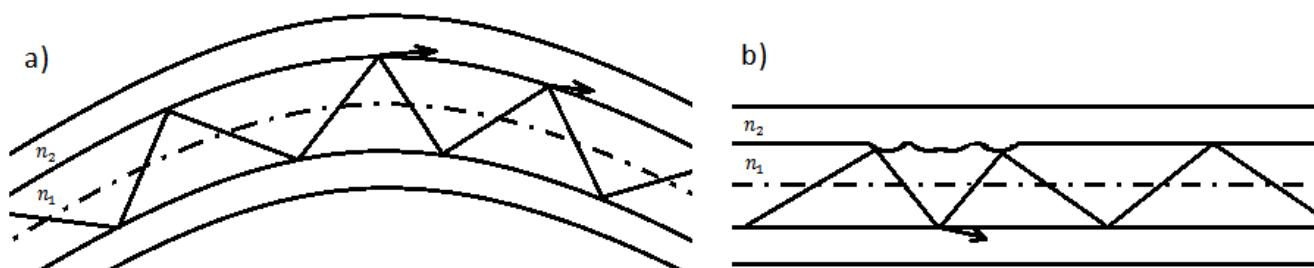
Obrázek 2.5: Druhy útlumů optických vláken

2.4.1 Ohybové ztráty

Ztráty ve vláknech vznikají porušením podmínky totálního odrazu. Jestliže navazujeme paprsek světla do vlákna pod větším úhlem, než je úhel mezný, tak s každým odrazem paprsku je část energie vyvázána z vlákna. K ohybům vlákna dochází zejména při jejich instalaci. Poloměry ohybů se pohybují v řádech centimetrů. Ohybové ztráty dělíme obecně na:

Makroohyby – poloměr zakřivení je větší než průměr vlákna

Mikroohyby – poloměr zakřivení je menší než průměr vlákna. Vznikají při výrobě vlákna a působením sil v kabelu. Avšak mikroohyby mohou být užitečné, jelikož je můžeme využít v optických senzorech. Zde využíváme fotoelastický jev, který se vyznačuje tím, že index lomu je funkcí tlaku.



Obrázek 2.6: a) makroohyb, b) mikroohyb

2.4.2 Rozptylové ztráty

Rozptylové ztráty dělíme na lineární, mezi které patří Rayleighův a Mieův rozptyl. A nelineární, kde patří Ramanův a Brillouinův rozptyl.

Rayleighovy rozptylové ztráty jsou způsobeny nečistotami a nehomogenitami v indexu lomu materiálu. Na těchto nečistotách a nehomogenitách dochází k rozptylu světla všemi směry. Velikost rozptylu můžeme zlepšit pomocí technologie výroby vlákna, ale nehomogenity materiálu vlákna nejsme schopni odstranit.

Mieův rozptyl vzniká právě na nehomogenitách, které jsou svou velikostí podobné nebo větší, než je pracovní vlnová délka. Jsou způsobeny nedokonalým geometrickým zpracováním optického vlákna, změnami indexu lomu mezi jádrem a pláštěm. U Mieova rozptylu jsme schopni tyto nehomogenity odstranit, nebo alespoň minimalizovat pomocí pečlivé výroby procesu tažení vlákna.

Nelineární rozptyl vzniká v optickém vlákně, do kterého je navázáno světlo o vysokém výkonu. Vznikají především u jednovidových vláknech. Nelineární rozptyly se od lineárních liší odlišnou vlnovou délkou rozptýleného světla. Tyto nelineární rozptyly se využívají při optických měřeních.

2.4.3 Absorpční ztráty

Tyto ztráty vznikají na nečistotách materiálu jádra optického vlákna, ale také vlastnostmi SiO_2 křemíku, který je použit při výrobě vlákna. Absorpční ztráty jsou nejběžnějším typem materiálových ztrát v optických vláknech. Nejčastějšími nečistotami křemenného skla při výrobě příměsí kovů jsou OH^- ionty, ionty kovů železa, mědi, niklu a magnézia. Při absorpčních ztrátách dochází k přeměně elektromagnetické energie na energii tepelnou, kde právě průchod světla o dané vlnové délce nečistotou je doprovázen tepelnou ztrátou.

Vlastní absorpce – vzniká přímo v materiálu vlákna, kterým je křemenné sklo, tuto absorpci ovlivnit nemůžeme. U skla se skládá z ultrafialové absorpce, která je způsobena elektronovými přechody ve skle a z infračervené absorpce, která je způsobena kmitáním molekul. Jediná možnost, jak ovlivnit tuto absorpci je změna materiálu použitého při výrobě vlákna.

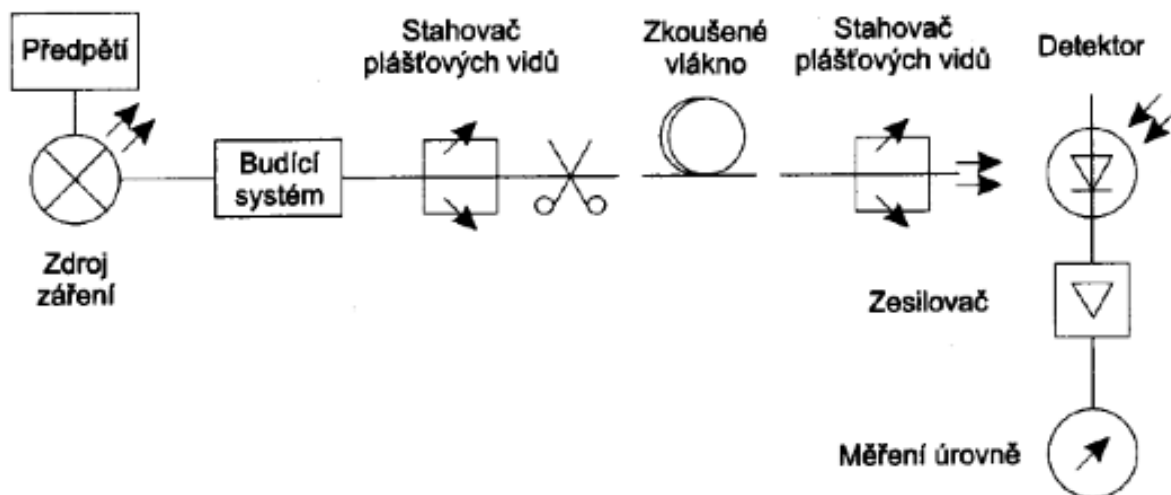
Nevlastní absorpce – je způsobena OH^- ionty, jejichž výskyt se při výrobě snažíme co nejvíce eliminovat. Tyto ionty způsobují mikrotrhliny, díky kterým jsou vlákna více náchylná na praskání. Tuto absorpci lze minimalizovat vysokou čistotou materiálu. Výskyt nevlastních absorpčních ztrát je při dnešní vysoké úrovni výroby téměř nulový.

3 Metody měření útlumu

Při měření útlumu optických vláken jsou používány tři metody měření. A to metoda dvou délek (kterou využíváme při měření v této bakalářské práci), metoda vložených ztrát a metoda měření zpětného rozptylu. První dvě metody označujeme jako přímé metody měření, jejichž výstupem je právě útlum vlákna pro danou vlnovou délku. A třetí metoda (která je nejčastěji používanou metodou v praxi) je taktéž nazývána jako metoda optické reflektometrie neboli OTDR, která nám poskytuje informace o kvalitě vlákna po dobu celého měřeného úseku. Všechny tyto metody můžeme uplatnit při měření optických přenosových tras v terénu.

3.1 Metoda dvou délek

Metoda dvou délek patří mezi nepřesnější metody. Tato metoda se zakládá na přímé definici útlumu, který je popsán vzorcem (1.9). Taktéž tato metoda slouží jako referenční. Mezi výhody patří vysoká přesnost měření, kde se odchylky pohybují v řádech setin decibelu. Avšak nevýhodou je časová náročnost a také destruktivnost této metody. Jestliže využíváme k měření metodu dvou délek, tak pomocí této metody je měřen celkový útlum daného úseku vlákna a nemůžeme zjistit informaci, která se týká útlumu v jakékoli části vlákna. Taktéž je obtížné touto metodou změřit změny útlumu při měnících se vnějších podmínkách.



Obrázek 3.1: Postup měření útlumu metodou dvou délek [6]

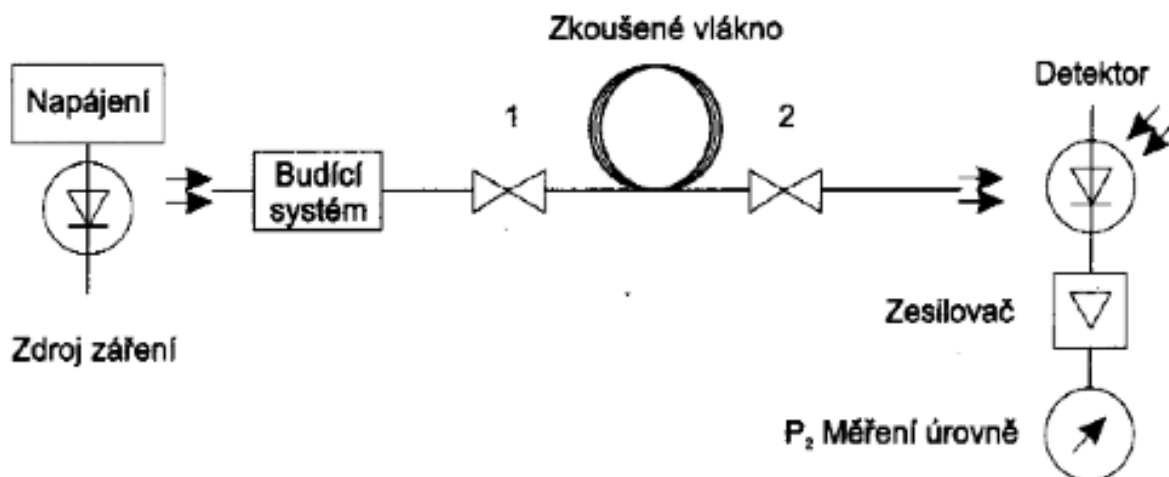
K samotnému měření útlumu je použit zdroj světla, stahovač plášťových vidů a detektor (měřič) výkonu. Pod pojmem vidový filtr si můžeme představit jako vlákno o několika závitech, které jsou namotány na hladký válec o průměru 2 – 5 cm. Pomocí ohybu vlákna dochází ke změně rozložení energie ve vlákně a vidy, které jsou slabé a šířily by se po omezenou vzdálenost jsou vyvázány z jádra.

Principem této metody je změření výkonu na výstupu vlákna, které analyzujeme. Aby se dodržely vstupní podmínky, analyzované vlákno musí být přelomeno na začátku (cca 2 m). Poté je nutné změřit výkon na konci tohoto krátkého vlákna, který představuje vstupní výkon do analyzovaného vlákna.

3.2 Metoda vložených ztrát

Tato metoda na rozdíl od metody dvou délek není destruktivní. Odchyłky měření se pohybují okolo desetin decibelu, jelikož je závislá na kvalitě spojení referenčního a měřeného vlákna. Metoda je dvoustupňová. Kde v prvním kroku se měřicí souprava kalibruje přímým propojením zdroje s měřičem výkonu pomocí referenčního vlákna, které má délku přibližně 2 m. Pomocí tohoto postupu získáme vstupní výkon. V dalším kroku je místo referenčního vlákna zapojeno vlákno, které je měřeno a na jeho výstupu se odečte hodnota výstupního výkonu.

Pomocí této metody dostaneme celkový útlum měřeného úseku vlákna. Jelikož známe referenční hodnotu, můžeme pomocí této metody změřit útlumy v závislosti na vnějších vlivech, jako jsou teploty, tlak nebo radiace. Tato metoda je používána, jestliže není možné lámat a zkracovat vlákno. Tato metoda je méně přesná, než metoda dvou délek, ale zato umožňuje reprodukovatelnost.

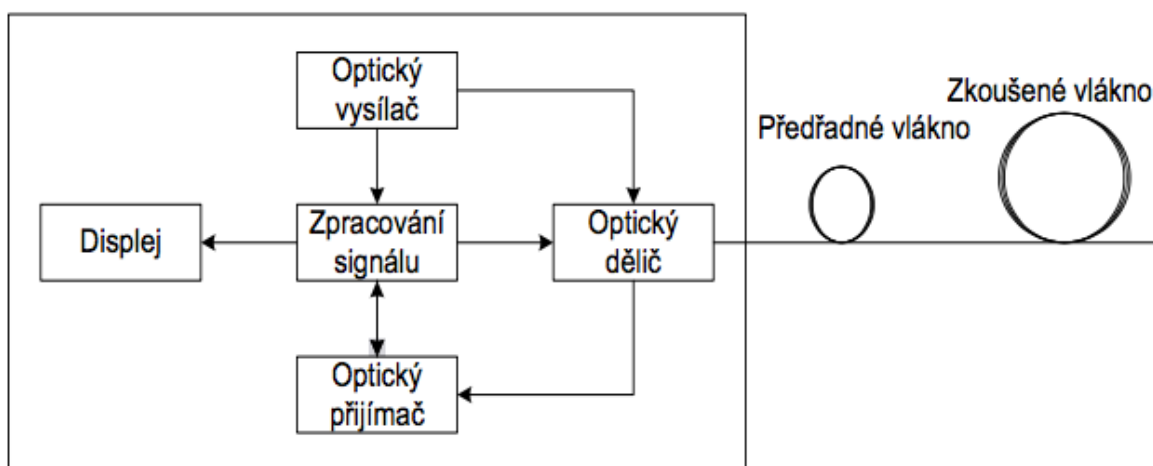


Obrázek 3.2: Postup měření útlumu metodou vložených ztrát [6]

3.3 Metoda zpětného rozptylu

Metoda zpětného rozptylu je měřicí metodou útlumu, která využívá odraz části výkonu signálu při průchodem světlovodem. Když světelné paprsky procházejí vláknem, dochází ke dvěma jevům. První jev se nazývá Rayleighův rozptyl, kdy část tohoto rozptylu se šíří zpět vláknem. A druhým typem rozptylu jsou Fresnelovy, ke kterým dochází, když světelné paprsky dopadají na rozhraní dvou prostředí, které mají různé indexy lomu. Pomocí Rayleighova rozptylu můžeme sledovat postupnou ztrátu výkonu, která je způsobena útlumem vlákna. A za pomoci Fresnelova odrazu můžeme určit polohu a útlum zapojených konektorů, svárů nebo porušení vlákna.

Pomocí krátkých impulsů vysílaných do vlákna se vyhodnocuje časová závislost výkonu světla odraženého zpět.



Obrázek 3.3: Postup měření útlumu metodou zpětného rozptylu [3]

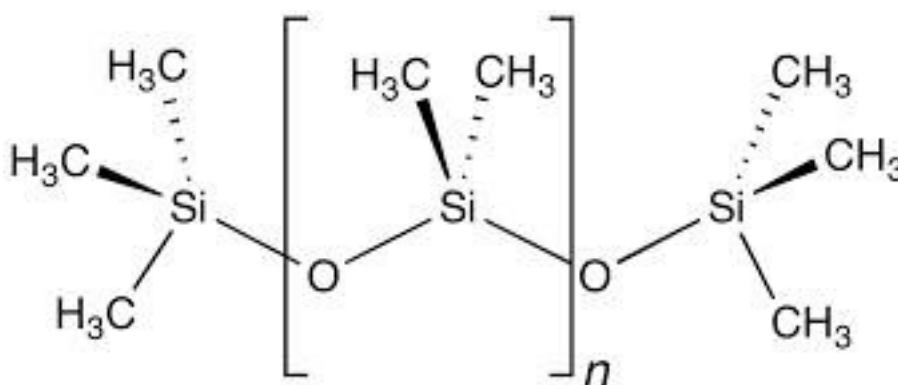
Zdrojem signálu je laser, který je schopen vysílat krátké impulsy. Šířku impulsů, které jsou vysílány, určíme dle délky měřené trasy. Čím je trasa delší, tím delší jsou impulsy. Nevýhodou je, že s delšími impulsy se snižuje citlivost detektoru. Když paprsek projde děličem, tak je paprsek navázán do vlákna.

4 Polydimethylsiloxan

Polydimethylsiloxan neboli zkráceně PDMS patří mezi polymerní organokřemičité sloučeniny, které se taktéž označují jako silikony. PDMS je jedním z nejpoužívanějších organických polymerů založených na bázi křemíku. Polydimethylsiloxan díky svému chemickému složení patří mezi materiály opticky čisté. Tudíž obsahují malou míru nehomogenit.

Jedná se o čirou kapalinu, která nemá chuť ani zápach a díky své viskozitě je téměř nerozpustná ve vodě. PDMS je odolný vůči radiaci, UV zářením, vysokým teplotám a chemikáliím. Rozsah použití tohoto materiálu je opravdu rozsáhlý. Jeho využití lze nalézt např. v automobilovém průmyslu, letectví, lékařství (prsni implantáty), kosmonautice, potravinářství (jako odpěňovač) a elektronice. Mezi hlavní nevýhody patří nákladná a složitá výroba. Mezi výhody patří výborná teplotní stabilita.

Pro výrobu PDMS se používá technický křemík s kombinací kyseliny chlorovodíkové, kdy tyto dvě látky společně vytváří chlormetan. Při výrobě dochází ke čtyřem chemickým reakcím – syntéze, rektifikaci, hydrolýze, polykondenzaci. Obrázek 4.1 zobrazuje konečné chemické složení PDMS.



4.1: Chemické složení polydimethylsiloxanu [9]

4.1 Sylgard

Toto označení slouží pro dvousložkový elastomer na bázi polydimethylsiloxanu, který je doplněn o vytvrzovací činidlo. Jestliže není přidáno vytvrzovací činidlo, není možné PDMS vytvrdit. Právě až po přidání vytvrzovacího činidla je možné PDMS pod zvýšenou teplotou vytvrdit. Díky různým variantám silikonových gelů existuje škála různých vlastností, které se liší svým použitím.

4.1.1 Sylgard 170

Sylgard 170 se vyznačuje především schopností samozhašování a po vytvrzení je velmi pružný a vysoce odolný. Teplotní rozsah se pohybuje v rozmezí - 60°C až + 200°C. Jelikož jsou jednotlivé složky rozlišeny barevně, je možné pro kontrolu mísení v poměru 1:1 sledovat i vizuálně. Udávané vytvrzovací teploty jsou 70°C po dobu 15 minut, 100°C po dobu 8 minut a při teplotě 150°C pouze 3 minuty. [8]

Využití:

Tento elastomer je možné využívat pro zalévání televizních transformátorů, elektronických jednotek v automobilovém průmyslu. Taktéž se používá pro zapouzdřování elektrických zdrojů a feritových jader.[8]

4.1.2 Sylgard 517

Sylgard 517 je znám jako samozacelující čirý gel, který má nízkou viskozitu. Tento materiál se míchá v poměru 1:1 s vytvrzovacím činidlem. Teplotní rozsah se pohybuje v rozmezí - 50°C až + 200°C. Ke většině materiálům má trvalou adhezi (přilnavost). K důležitým výčtům jeho vlastností patří utlumení vibrací a mechanických rázů a taktéž odolnost vůči teplotním změnám. Vytvrzení probíhá za pokojové teploty ale k urychlení procesu se používá zvýšené teploty. Pro vytvrzení jsou doporučené teploty 60°C pro dobu 4 hodin, 100°C pro 1 hodinu a 150°C pro dobu 15 minut. Vytvrzovací činidlo a Sylgard 517 se míchají v poměru 1:1. [8]

Využití:

Tento materiál byl speciálně navržen pro využití na místech, kde je požadován dlouhotrvající těsnící efekt proti vlhkosti. Např. v optoelektronice k utěsnění spojek a optických kabelů. Taktéž slouží jako ochrana pro elektronické obvody.[8]

4.1.3 Sylgard 182 a 184

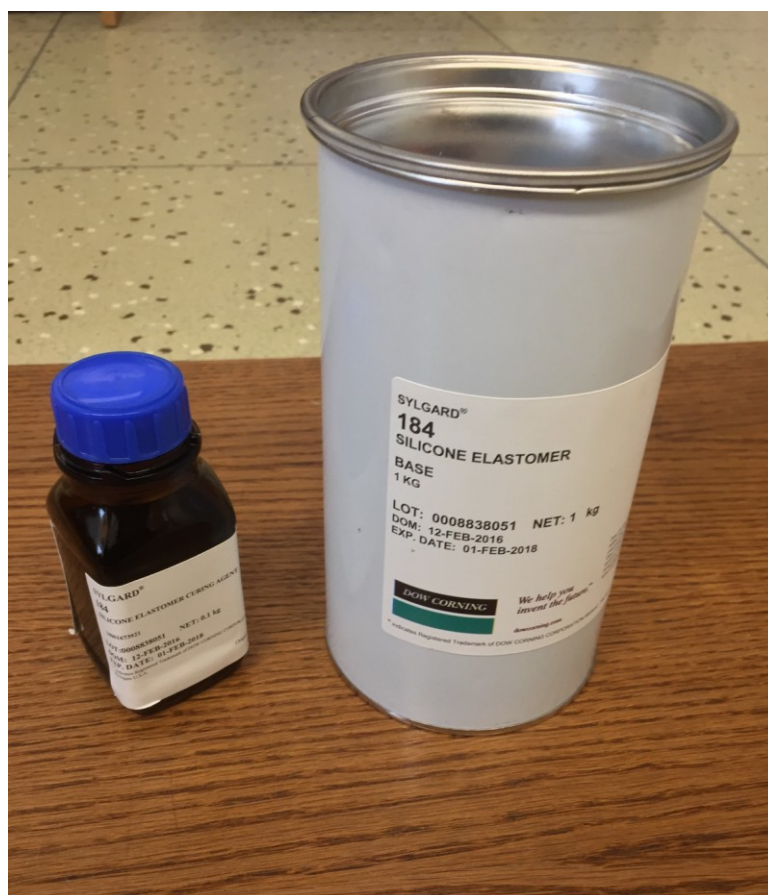
Tyto dva elastomery patří mezi středně viskózní kapalně elastomery u kterých se teplotní rozsah pohybuje v rozmezí -55°C až +200°C. V širokém rozmezí frekvencí mají skvělou fyzikální a elektrickou stabilitu. Právě díky své odolnosti vůči vodě, mechanickému poškození a radiaci představují ideální ochranu vůči vnějšímu prostředí. Pro vytvrzení Sylgardu 182 je důležitá teplota zatímco pro Sylgard 184 stačí pokojová teplota 25°C.[8]

Využití:

Oba tyto druhy jsou speciálně navrženy pro zapouzdřování desek plošných spojů, zdrojů proudů nebo zesilovačů, Taktéž se používají jako ochrana pro konektory nebo vinutí.

5 Výroba vzorků z PDMS

Tato kapitola popisuje praktickou realizaci výroby vzorků z polydimethylsiloxanu. Pro svou práci jsem používal Silicon Elastomer 184, který vyrábí firma Dow Corning. Jelikož samotný Silicon je velice viskózní a svou strukturou spíše připomíná mazivo, je zapotřebí jej vytvrdit. Jestliže by nedošlo k vytvrzení, jednalo by se spíše o bezbarvou kapalinu. Až po vytvrzení je PDMS schopen vést světlo. Čím více je polydimethylsiloxan vytvrzen, tím lépe vede světlo. Pro vytvrzování jsem použil tvrdící činidlo, které je dodáváno od stejnojmenné firmy společně se Siliconem. Dle datasheetu je doporučeno míchat Silicon společně s tvrdidlem dle poměru 10:1. Což znamená, že k deseti dílkům Siliconu se přidá jeden dílek tvrdícího činidla. S tímto poměrem se dá samozřejmě manipulovat. Například pro 20 gramů Siliconu připadnou dva gramy tvrdidla.



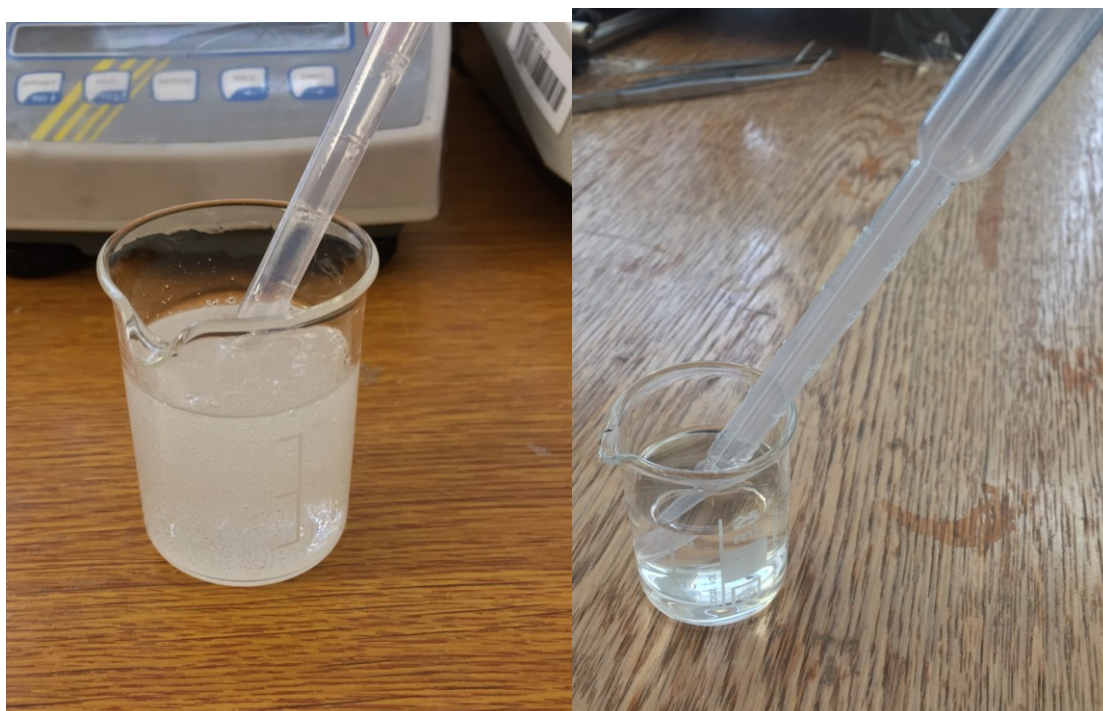
Obrázek 5.1: Sylgard 184 a vytvrzovací činidlo

5.1 Příprava směsi

Před samotným měřením předcházela příprava směsi. Samotný Silicon Elastomer jsem nabíral injekční stříkačkou a pro malé množství činidla mi stačila pipeta. Bylo nutné použít jiný prostředek k nabrání kapaliny aby nedošlo ke znečištění činidla Siliconem. Prvním krokem bylo nabrání Silicon Elastomeru 184 ke kterému jsem následně přidával činidlo v doporučeném poměru 10:1. Jelikož obě

tyto kapaliny mají různé hustoty, bylo za potřebí směs manuálně promíchat. K promíchání mi postačila pipeta. Důvodem míchání bylo důkladné spojení Silicon Elastomeru a činidla, aby nedošlo k situaci, kde by činidlo zůstalo pouze na povrchu, kde bylo nalito. Po důsledném promíchání ve směsi vznikla spousta vzduchových bublinek (viz obr. 5.2), které by narušovaly lom světla ve finálním vzorku. A proto jsem tuto směs dal do lednice a díky její nízké teploty došlo k vymizení vzduchových bublinek uvnitř kádinky (viz obr. 5.2). V lednici bylo potřeba ponechat tuto směs alespoň po dobu 70 minut.

Teprve po této době bylo možné s touto směsí manipulovat.



*Obrázek 5.2: Vlevo – promíchaná směs se vzduchovými bublinkami,
vpravo – odstátá směs po 3 hodinách*

5.2 Tvorba vzorků z PDMS

Po důsledném nastudování polydimethylsiloxanu a osvojení si metody přípravy směsi jsem se pustil do samotné výroby krátkých úseků optických vláken z PDMS.

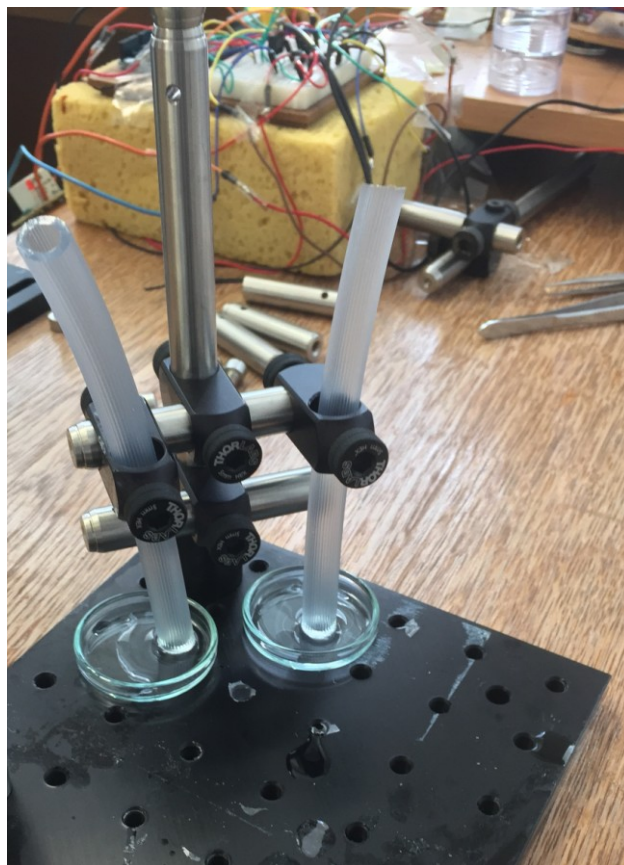
Jako formu, do které se vlévala směs jsem použil silikonové hadičky, které se používají ve zdravotnictví (při tracheostomii). Tudíž jsem měl jistotu ohledně kvality hadiček a jejich sterilitě. Průměr těchto silikonových hadiček je 6 mm a jsou tepluvzdorné až do teploty 150°C. Před nalitím směsi do hadiček je bylo za potřebí narovnat, aby nedošlo k vylití směsi při manipulaci. Použil jsem jednoduchou metodu, kdy jsem na konec hadiček zavěsil závaží a pomocí gravitace je narovnal. (obr. 5.3).



Obrázek 5.3: Narovnání silikonových hadiček

Poté, když byly silikonové hadičky narovnané, pomocí skalpelu jsem je nařezal na 24 vzorků o délce 10 cm a mohl jsem pokračovat dále ve výrobě.

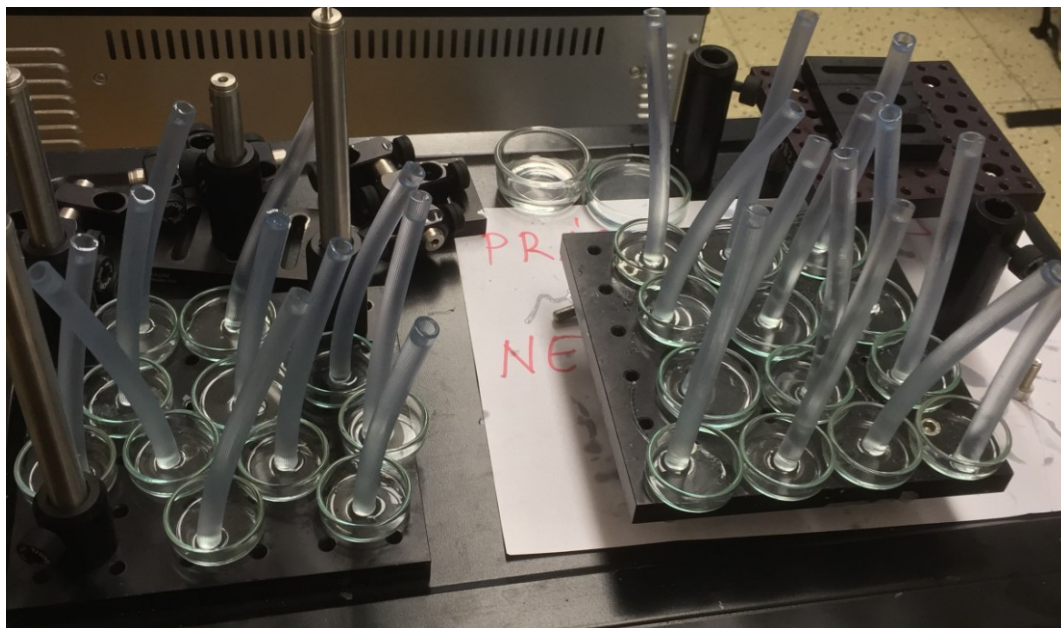
Dalším krokem bylo použití namíchané směsi (bez vzduchových bublinek) k ucpání spodní části hadiček (obr 5.4) a následnému zapečení v troubě při teplotě 100°C po dobu 70 min. Bylo nutné použít sestavu držáků, aby nedošlo k pohybu a následnému porušení spojení Siliconu a hadiček. Tímto krokem jsem zabránil, aby mi směs nevytékala z hadičky do Petriho misky. Takto jsem postupoval při výrobě všech 24 vzorků.



Obrázek 5.4: Ucpání spodní části hadiček

Následovalo nalití směsi do připravených ucpaných vzorků. Pro přenos této směsi jsem použil injekční stříkačku, jelikož mi umožňovala nabrat dostatečné množství směsi. Bohužel při přenosu a následné aplikaci směsi docházelo ke znovu vytvoření vzduchových bublin. Po vyzkoušení různých metod naklánění vzorků, nalévání a dokonce přechodu z injekční stříkačky na pipetu jsem stále docházel k nežádoucímu vytváření vzduchových bublin. A proto jsem se vrátil k metodě aplikace pomocí injekční stříkačky a po následném naplnění vzorků Siliconem jsem je umístil zpět do lednice, kde její nízká teplota mi znovu pomohla k dokonalému odstranění vzduchových bublin. Tentokrát jsem vzorky nechal v lednici po dobu 24 hodin, abych se ujistil, že opravdu dojde k důslednému vymizení vzduchových bublin. Tato metoda výroby je časově velmi náročná, ale zato zaručuje dokonalý výsledek. Tuto metodu jsem aplikoval na všech 24 vzorků.

Jedním z posledních kroků výroby bylo zapečení všech vzorků v troubě. Tentokrát jsem zvýšil teplotu na 120°C díky čehož jsem mohl urychlit proces tvrdnutí Siliconu ve vzorcích. Po 60 minutách v troubě jsem je mohl vyjmout a nechat odstát při pokojové teplotě (20°C).



Obrázek 5.5: Všechny 24 vzorků z PDMS po zapečení

Jako poslední krok výroby vzorků bylo jejich samotné vyjmutí ze silikonové formy. Z počátku se mi nedařilo vzorek vyjmout z formy, jelikož neustále docházelo k poškození samotného vlákna během řezání. Ale po několika neúspěšných pokusech jsem mohl vědět, jak velkou sílu mám vyvinoutou na skalpel, aniž bych narušil samotný vzorek z polydimethylsiloxanu. Rád bych zdůraznil, že vzorek po vyjmutí z formy je opravdu velmi náchylný k nečistotám. Proto jsem aplikoval samotné řezání a vyjímání vzorků z forem až těsně před měřením, aby tak došlo k jejich co k nejmenšímu zašpinění, jehož nečistoty by měly vliv na měření. I tak se mi nepodařilo kompletně uchránit vzorek před nečistotami jelikož se mi nepodařilo pracovat v naprosto sterilním prostředí. Taktéž práce v rukavicích chránila vzorek před nečistotami z rukou.



Obrázek 5.6: Vzorek v silikonové formě



Obrázek 5.7: Vzorek po nažíznutí formy



Obrázek 5.8: Finální vzorek z PDMS



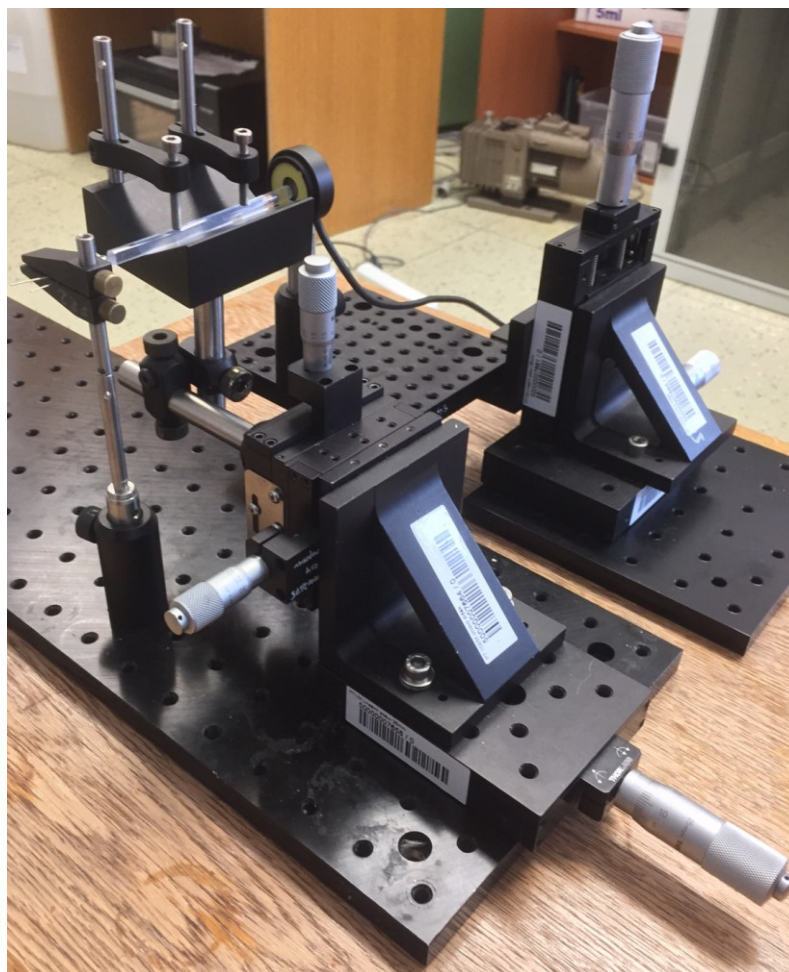
Obrázek 5.9: Špatně vyrobený vzorek se vzduchovými bublinami

6 Měřicí pracoviště

6.1 Model THORLABS

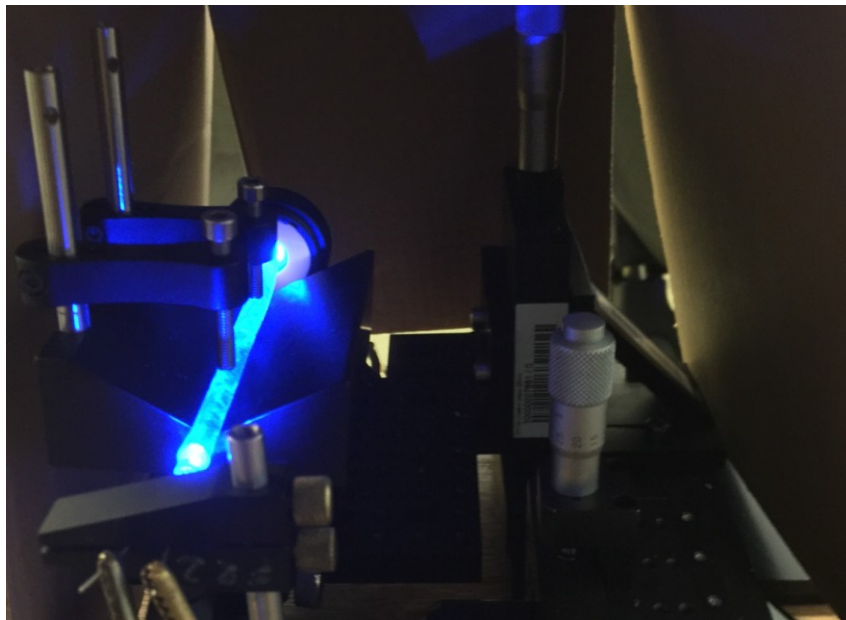
K tomu, aby se mi podařilo změřit útlumy optických vláken z PDMS, bylo nutné sestavit měřicí pracoviště, kde by bylo možné umístit světelný zdroj, vzorky z PDMS a optický detektor. Právě k těmto potřebám mi posloužil konstrukční model od firmy THORLABS se sídlem ve Spojených státech Amerických. Tato firma se zabývá výrobou fotonických produktů, které je možné zakoupit po celém světě. THORLABS disponuje opravdu širokým sortimentem ať už od konstrukčních soustav tak po ty nejmenší fotonické části. Tato firma si dává opravdu záležet na jejich výrobcích, jelikož jejich stavebnice jsou vyhotoveny z odolného materiálu, který je vyhotoven ze slitiny kovu.

Pro své měření se využil pouze malou část jejich produktů. Potřeboval jsem plošnou kovovou desku (základnu), ke které jsem upevnil zbývající komponenty. Dále posuvné držáky, které mi umožňovaly vertikální a horizontální pohyb se samotným vzorkem z PDMS a horizontální posuvný držák pro optický detektor. Dále držák, který mi udržoval stabilní polohu vzorku a další držák, který sloužil k pevnému uchycení světelného zdroje, v mém případě LED diody.



Obrázek 6.1: Měřicí pracoviště THORLABS

Jelikož optický detektor snímal také okolní světlo, použil jsem krabici, která mi zatemnila celé měřicí pracoviště.



Obrázek 6.2: Zatemněné měřicí pracoviště

6.2 Použité elektronické prvky

Pro napájení světelného zdroje (LED diod) jsem využil laboratorní zdroj Manson NP-9625. Na výstupu byl zapojen optický detektor THORLABS S120VC, který má vlnový rozsah 200 – 1 100 nm. Na těchto vlnových délkách jsem prováděl měření. Tento optický detektor byl připojen k optickému power metru PM100USB, taktéž od firmy THORLABS. A tento power metr byl pomocí usb připojen k počítači se systémem Windows, ve kterém byl nainstalován software ThorLabs PM100/200.

Parametry použitých elektronických přístrojů:

Laboratorní zdroj Manson NP-9625

- Výstupní napětí: 0 – 30 Vdc
- Výstupní proud: 10 A

Fotodetektor ThorLabs S120VC

- Rozsah vlnových délek: 200 – 1 100 nm
- Výkonový rozsah: 50 nW – 50 mW
- Odchylka měření: $\pm 3\%$ (440 – 980 nm), $\pm 5\%$ (280 – 439 nm), $\pm 7\%$ (200 – 279 nm, 981 – 1100 nm)

ThorLabs Powermetr PM100USB

- Rozsah vlnových délek: 185 nm – 25 μm
- Výkonový rozsah: 100 pW – 200 W
- Šířka pásma: 100 kHz

6.3 Použité zdroje elektromagnetického záření

Jako zdroj světelného záření jsem použil LED diody o velikosti 5 mm v rozsahu vlnových délek 400 – 624 nm. Jelikož tyto zdroje záření jsou všesměrové, při nákupu diod jsem se zaměřil na LED diody s co nejmenším vyzařovacím úhlem, který činil 30°. Seznam všech použitých LED diod (seřazených dle vlnové délky) s jejich parametry se nachází v Tabulka 1.1.

Barva LED diody	Vlnová délka [nm]	Napětí [V]	Proud [mA]	Svítivost [mcd]
Červená	624	2,1	20	6000
Oranžová	605	2	20	4000
Žlutá	590	2,8	20	8000
Zelená	525	3,2	20	16000
Modrá	470	3,2	20	6000
Fialová	430	3,6	25	4000

Tabulka 1.1: Seznam použitých LED diod

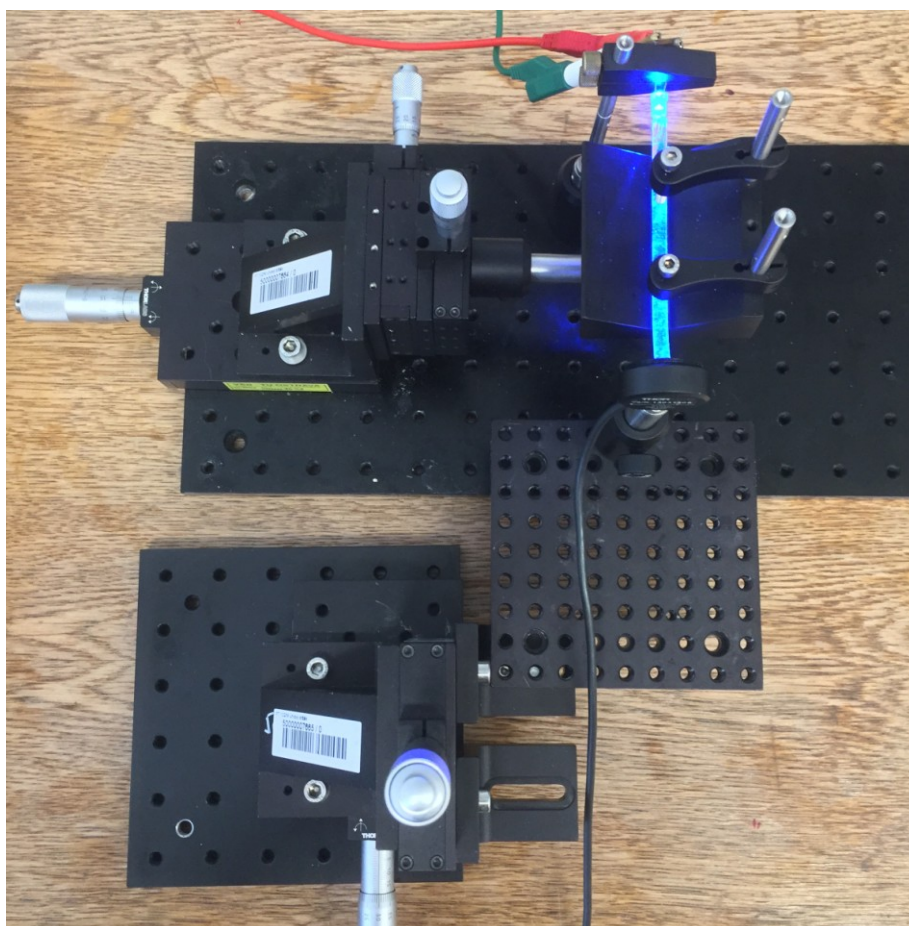
7 Praktické měření

7.1 Metodika měření

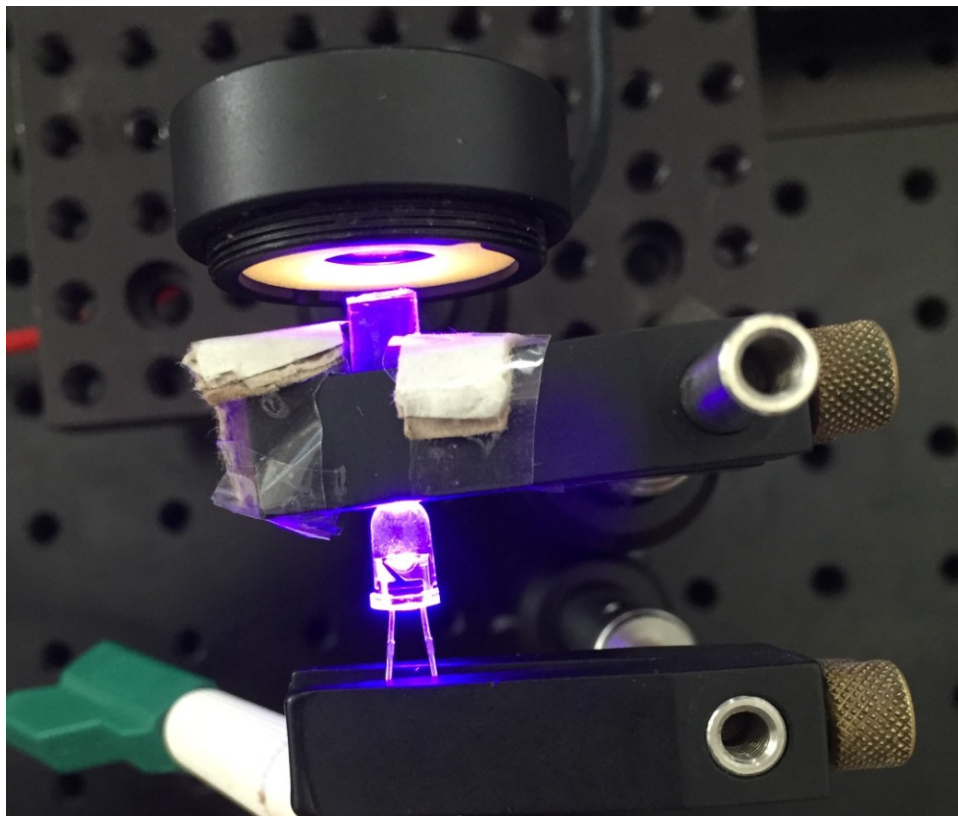
Jako první krok bylo přivedení na svorky LED diody stejnosměrné napětí a pomocí laboratorního zdroje bylo dále doladován procházející proud. Samotný zdroj taktéž ukazoval hodnotu nastaveného napětí.

Na měření útlumu jsem aplikoval metodu dvou délek tzn. prvním krokem bylo změření výkonu optickým detektorem ThorLabs S120VC pro nezkrácený vzorek z PDMS o délce 10 cm a druhý krok se opakoval stejnou metodou, akorát pro zkrácený vzorek o délce 1 cm. O zkráceného vzorku jsem byl nucen ošetřit případ, kdy optický detektor snímal i světlo z LED diody. A proto jsem použil papír z kartónu jehož pomocí jsem zakryl části, kde docházelo úniku světla z LED diody, viz. *Obrázek 7.2* Tudíž pro každou vlnovou délku proběhlo 10 měření (5 měření pro nezkrácený vzorek a 5 měření pro zkrácený vzorek). V první části měření byl změřen útlum vláken z PDMS před zátěží. Toto měření bylo provedeno pro 6 vlnových délek.

V další části byly vzorky vláken z PDMS zatěžovány vodní lázní v různých intervalech. A v poslední části vzorky vláken byly zatěžovány vodní lázní o jiné teplotě.



Obrázek 7.1: Měření pro nezkrácený vzorek o délce 10 cm



Obrázek 7.2: Měření pro zkrácený vzorek o délce 1 cm

7.2 Zpracování výsledků a výpočtů

Ze statistického hlediska bylo dosaženo celkově 1 170 naměřených hodnot. Kdy bylo měřeno 6 LED diod. Pro každou LED diodu resp. vlnovou délku proběhlo 10 měření. Celkově byly vzorky z PDMS zatěžovány vodní lázní v intervalech 10, 20, 30, 60, 240 minut a dále 1, 2 3, 7 dny. Ve stejných intervalech, ale při jiné teplotě vody byly testovány další vzorky vláken z PDMS. Kompletní seznam naměřených hodnot je uveden v příloze bakalářské práce.

7.3 Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorek před zátěží

Jako první krok měření bylo zjištění útlumu nezatíženého vlákna z PDMS pro 6 LED diod resp. 6 vlnových délek. Naměřené a vypočtené hodnoty můžeme vidět v Tabulce 1.2. Největší hodnotu měrného útlumu můžeme pozorovat u červené LED diody o vlnové délce 624 nm, kde hodnota činila 0,2808 dB/cm. Zatímco nejnižší hodnotu útlumu poskytuje modrá LED dioda, totiž 0,0888 dB/cm. Útlum v rozmezí 624 – 470 nm klesá a od hodnoty 470 se postupně zvyšuje až na hodnotu 0,1522 dB/cm.

Tabulka 1.2: *Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorek před zátěží*

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	5,611	2,388	1,154	2,926	4,853	4,935
2.	5,218	2,621	1,318	2,587	4,643	4,915
3.	5,698	2,463	1,241	2,814	4,293	4,345
4.	5,530	2,233	1,227	2,947	4,178	4,055
5.	5,589	2,346	1,182	2,297	4,332	4,159
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,125	3,991	2,045	4,085	5,454	6,588
2.	10,462	4,259	2,313	4,253	5,112	6,120
3.	10,089	3,974	2,166	4,091	5,352	6,622
4.	10,993	4,392	2,246	4,203	5,673	6,363
5.	11,110	4,045	2,174	4,064	5,769	6,124
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,2808	0,2341	0,2522	0,1821	0,0888	0,1522

Postup výpočtu pro každou vlnovou délku probíhal následovně. V prvním kroku jsem sečetl všechny naměřené hodnoty pro nezkrácené vlákno a pro zkrácené vlákno. Výsledné hodnoty jsem dosadil do vzorce 1.9,

$$A = 10 \log \left(\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} \right)$$

kde hodnotu P_{in} zastupovalo zkrácené vlákno a hodnota P_{out} zastupovala nezkrácené vlákno. Dle vzorového výpočtu jsme postupoval pro každou vlnovou délku u všech měření.

Vzorový výpočet červenou LED diodu o vlnové délce 624 nm:

Nezkrácené vlákno: $5,611 + 5,210 + 5,968 + 5,530 + 5,509 = 27,646$

Zkrácené vlákno: $10,125 + 10,462 + 10,009 + 10,993 + 11,110 = 52,779$

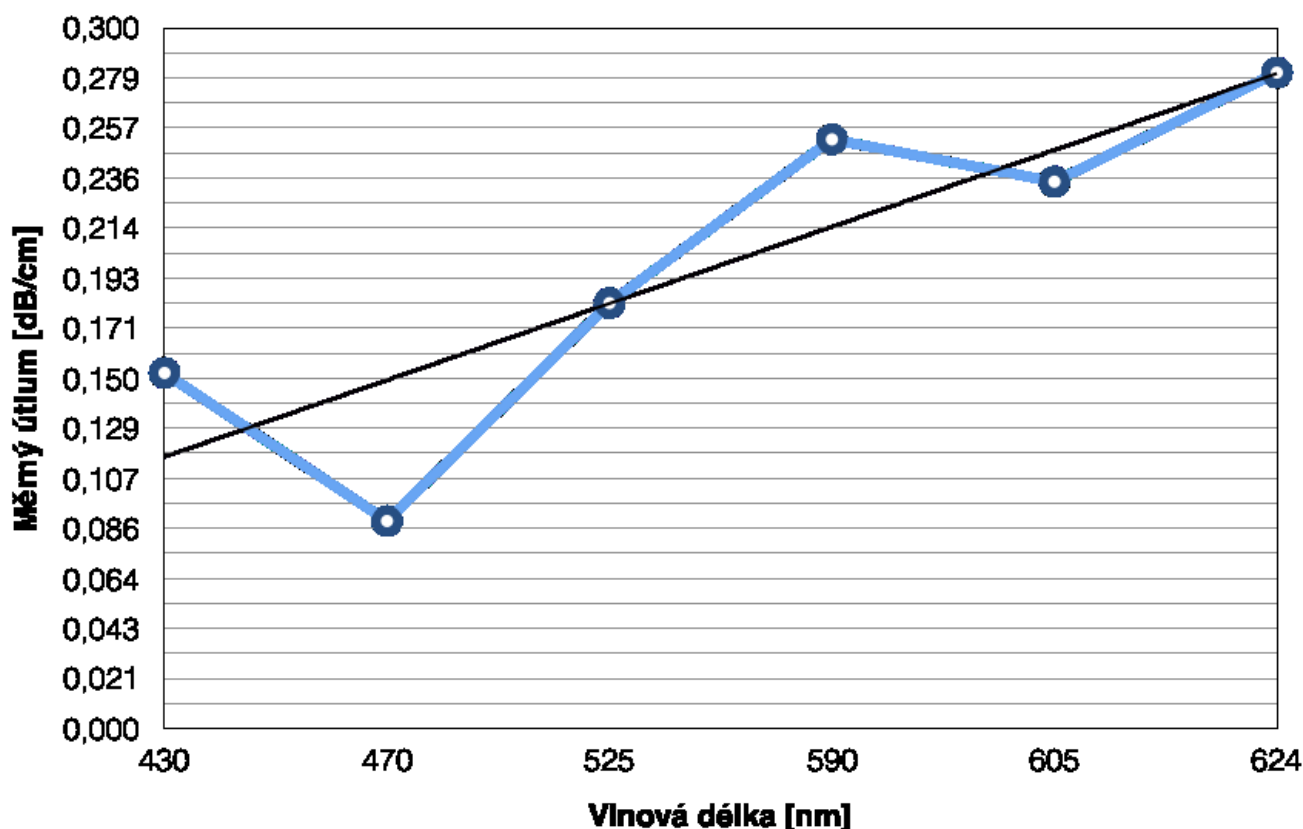
Výsledné hodnoty jsem dosadil do vzorce:

$$A = 10 \lg \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) = 10 \lg \left(\frac{52,779}{27,646} \right) = 2,808 \text{ dB/10cm}$$

tato hodnota není výsledná, jelikož se jedná o měrný útlum pro vzorek o délce 10cm. Proto ještě hodnotu 2,808 podělíme hodnotou 10, která reprezentuje délku celého vzorku. Tímto dostaneme výslednou hodnotu vztaženou na 1 cm vlákna z PDMS.

$$A = \left(\frac{2,808}{10} \right) = 0,2808 \text{ dB/cm}$$

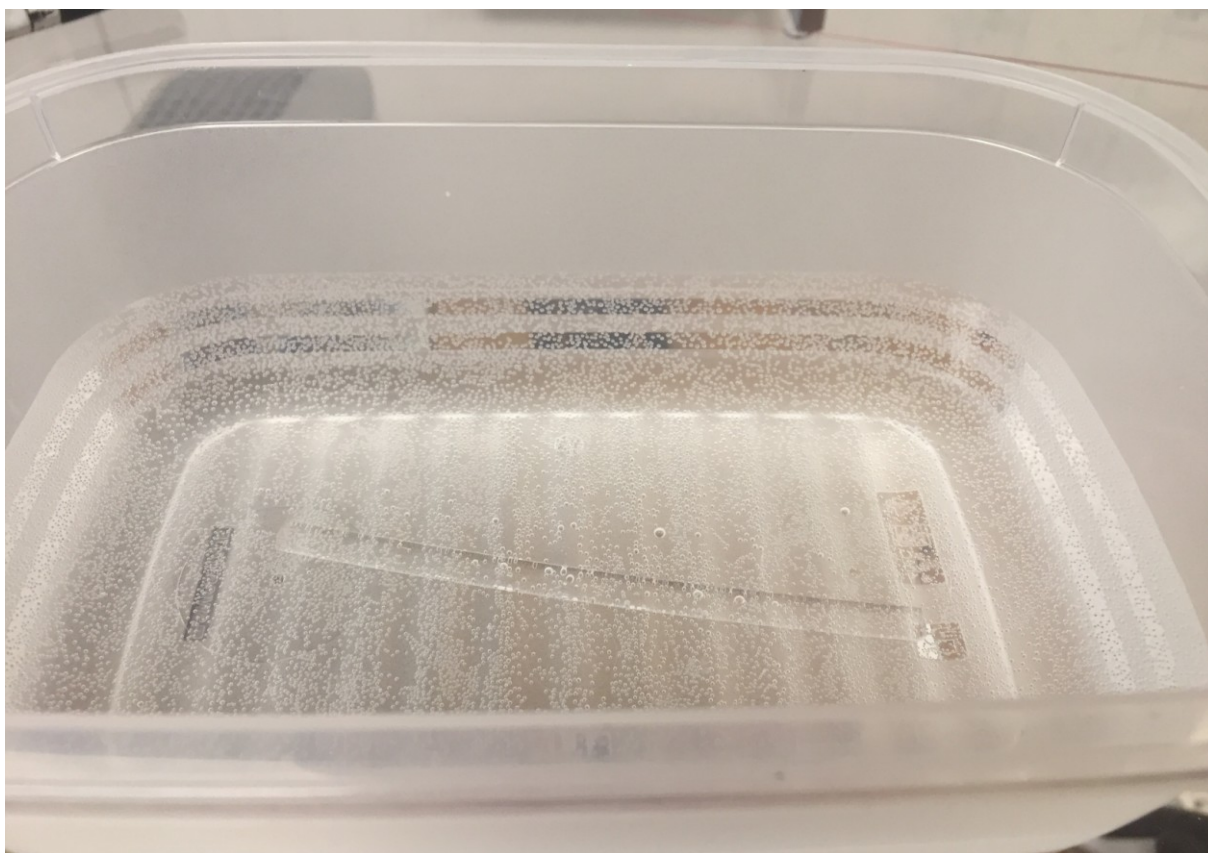
Spektrální závislost útlumu nezatíženého vzorku



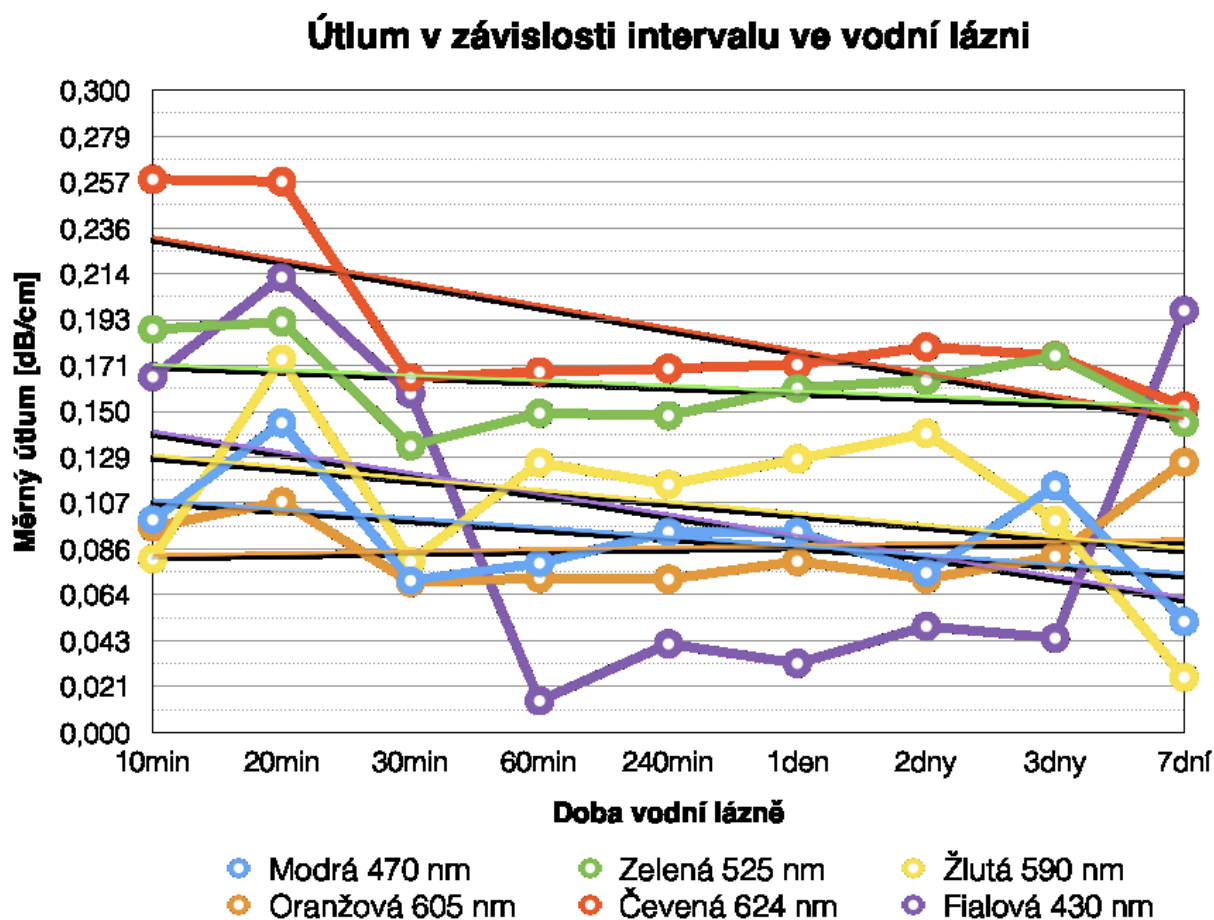
Obrázek 7.3: Spektrální závislost útlumu nezatíženého vzorku

7.4 Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorky zatěžované vodní lázní

U tohoto měření byly vlákna z PDMS zatěžovány vodní lázní v různých časových intervalech. Do nádoby byla nalitá voda o pokojové teplotě. První vzorek byl zatěžován vodní lázní po dobu 10 minut. Následně byl vytažen z nádoby a byl změřen útlum metodou dvou délek pro všechny vlnové délky. Takto jsem pokračoval i u dalších měření pro 20, 30, 60, 240 minut a 1, 2, 3 a 7 dní. Naměřené a vypočtené hodnoty lze nalézt v příloze této bakalářské práce. V této podkapitole se nachází graf, který znázorňuje měrný útlum všech vlnových délek při různých časových intervalech zátěže vodní lázní.



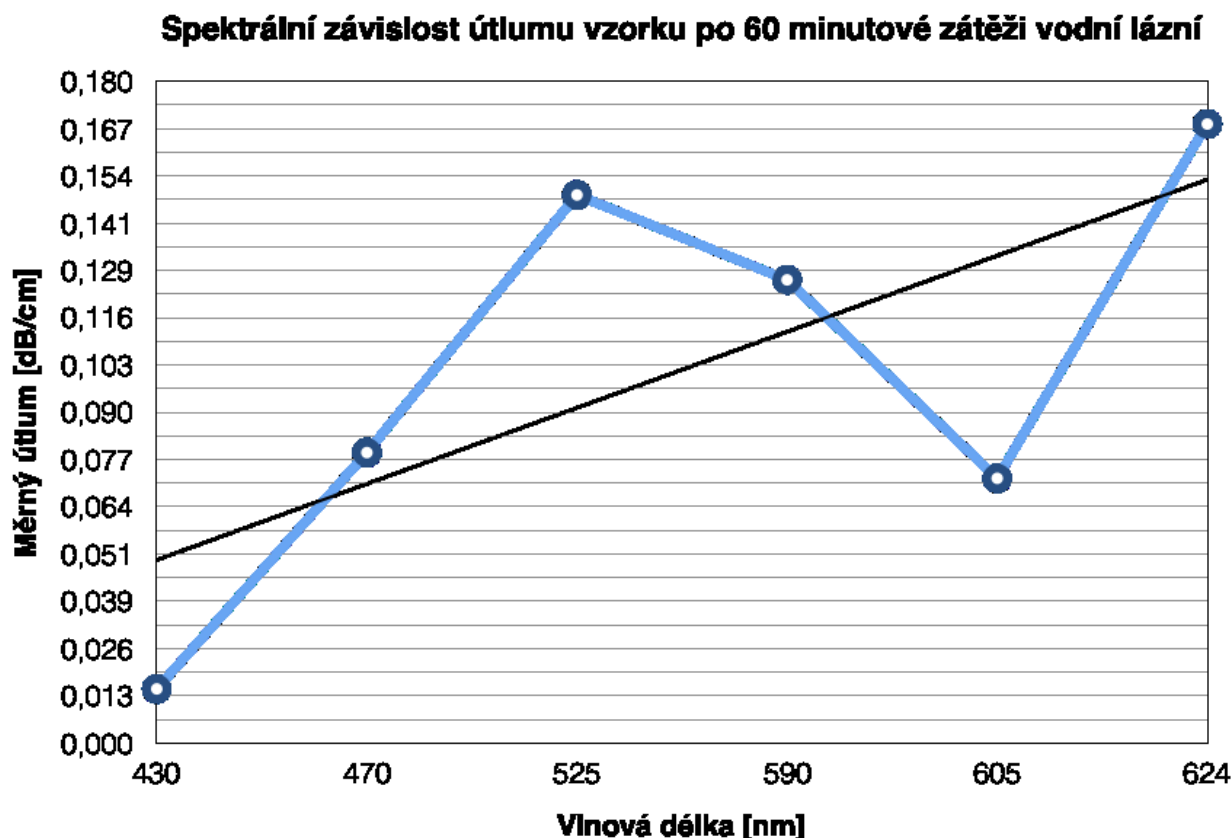
Obrázek 7.4: Vzorek zatěžován vodní lázní



Obrázek 7.5: Graf zobrazující útlum v závislosti na intervalu zátěže ve vodní lázni

Na Obrázku 7.5 můžeme vidět souhrn všech vypočtených hodnot měrného útlumu vztaženého k časovému intervalu, ve kterém byly vzorky vláken z PDMS zatěžovány. Z grafu je zřetelné, že u fialové LED diody došlo k rapidnímu poklesu útlumu v prvních 60 minutách. Po 60 minutách útlum mírně rostl a po 7 dnech došlo ke zvýšení útlumu. U žluté, modré, zelené a červené LED diody můžeme pozorovat kolísavé hodnoty, ale finální hodnota útlumu po 7 dnech je menší, než při zátěži vodní lázni po dobu 10 minut. Z dosáhnutých hodnoty, převedených do grafu vyplývá, že záleží na vlnové délce (viz. Obrázek 7.6) a na době, kterou je vlákno z PDMS zatěžováno vodní lázní. U některých vlnových délek dochází ke konstantnímu poklesu, zatímco u některých vlnových délek dochází k rapidním změnám měrného útlumu.

Nejvyšší útlum byl naměřen na červené LED diodě o vlnové délce 624 nm a to 0,2584 dB/cm při zátěži 10 minut ve vodní lázni. Za to nejmenší útlum byl naměřen u fialové LED diody o vlnové délce 430 nm a to 0,0147 dB/cm po 60 minutách ve vodní lázni.



Obrázek 7.6: Spektrální závislost útlumu po 60 minutách

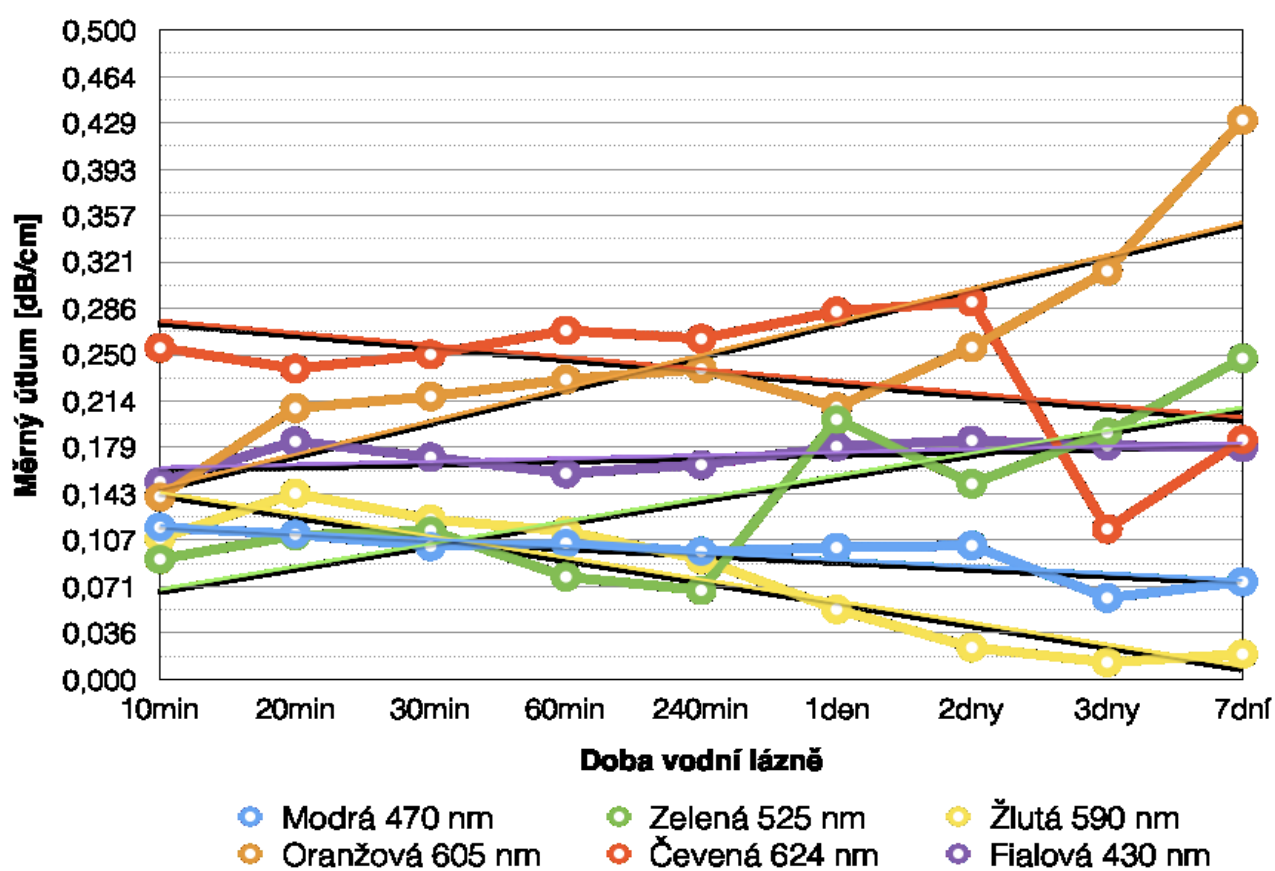
7.5 Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorky zatěžované vodní lázní o teplotě 55°C

V této části měření byly vzorky zatěžovány stejnými časovými intervaly ve vodní lázni jako v předešlé podkapitole, akorát voda měla teplotu 55°C. Toto měření bylo náročnější než předešlé, jelikož jsem se musel postarat o neustálou dodávku vody, jelikož při teplotě 55°C docházelo k pomalému vypařování vody. Postup přípravy byl jednoduchý, kdy jsem pouze potřeboval hrnec, vodu a termočlánek, kterým jsem si mohl ověřovat teplotu vody. Měření útlumu a výpočty probíhaly stejně, jako v předešlém měření. Naměřené a vypočtené hodnoty se nachází v příloze této bakalářské práce. Tato podkapitola obsahuje graf, ve kterém se nachází všechny naměřené útlumy vztažené časovému intervalu zatížení ve vodní lázni a taktéž spektrální závislost útlumu po 60 minutách ve vodní lázni o teplotě 55°C. Obrázek 7.7 popisuje způsob zatěžování vlákna a měření teploty vody.



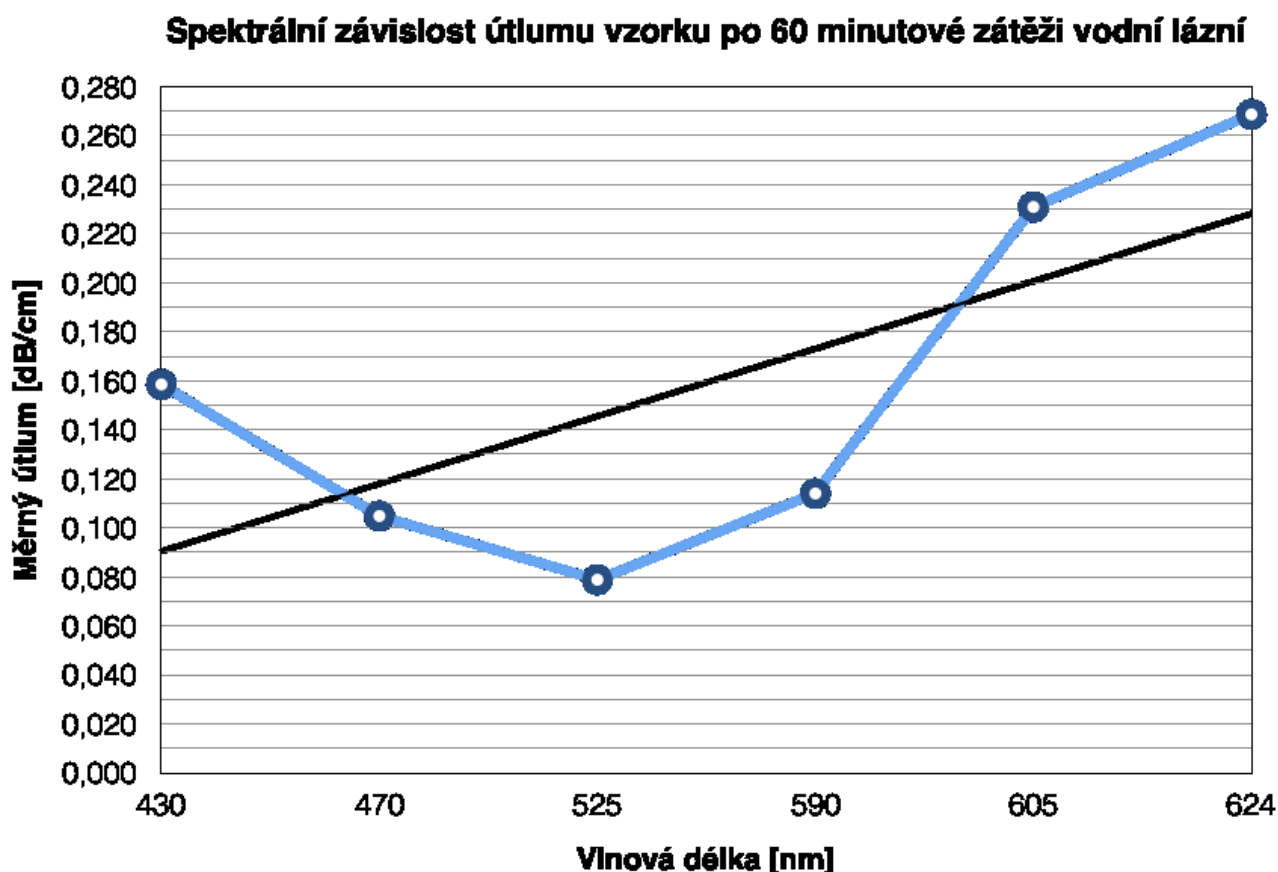
Obrázek 7.7: Zatěžování vlákna vodou o teplotě 55°C

Útlum v závislosti na teplotě vody



Obrázek 7.8: Graf zobrazující útlum v závislosti na teplotě vody

Na *Obrázku 7.8* můžeme pozorovat extrémní zvýšení útlumu u oranžové LED diody o vlnové délce 605 nm. Hodnota útlumu vzrostla z 0,1406 dB/cm na 0,4308 dB/cm po 7 dnech ve vodní lázni. Také u zelené LED diody o vlnové délce 525 nm dochází ke zvýšení útlumu, z hodnoty 0,0925 dB/cm na 0,2472 dB/cm po 7 dnech ve vodní lázni. Naopak u žluté, červené a modré LED diody dochází k poklesu útlumu. Fialová LED dioda se v tomto měření chová téměř konstantně a nedochází k extrémním výkyvům hodnot jako v předešlém měření.



Obrázek 7.9: Spektrální závislost útlumu po 60 minutách ve vodě o teplotě 55°C

Z grafu spektrální závislosti útlumu můžeme vidět, že po 60 minutách ve vodní lázni o teplotě 55°C dochází k poklesu útlumu a to od 624 až do 525 nm. Od 525 nm dochází k následnému nárůstu útlumu.

7.6 Porovnání chování vláken z PDMS před a po zátěži

Kvůli přehlednosti jsou všechny hodnoty uvedené v *Tabulce 1.3.* a *1.4.*

Tabulka 1.3: *Porovnání naměřených hodnot před a po zátěži vodní lázni*

LED dioda	Měrný útlum [dB/cm]									
	Nezatěžované vlákno	10 minut	20 minut	30 minut	60 minut	240 minut	1 den	2 dny	3 dny	7 dní
Červená 624 nm	0,2808	0,2584	0,2574	0,1657	0,1684	0,1700	0,1718	0,1801	0,1760	0,1524
Oranžová 605 nm	0,2341	0,0960	0,1078	0,07	0,0720	0,0716	0,0799	0,0717	0,0822	0,1263
Žlutá 590 nm	0,2522	0,0810	0,1743	0,0798	0,1260	0,1158	0,1277	0,1397	0,0990	0,0257
Zelená 525 nm	0,1821	0,1883	0,1918	0,1339	0,1491	0,1480	0,1608	0,1646	0,1760	0,1448
Modrá 470 nm	0,0888	0,0993	0,1446	0,0709	0,0790	0,0936	0,0936	0,0745	0,1151	0,0518
Fialová 430 nm	0,1522	0,1661	0,2126	0,1582	0,0147	0,0413	0,0322	0,0495	0,0440	0,1971

Ve výše uvedené tabulce jde vidět, že až na fialovou LED diodu došlo spíše k poklesu, než nárůstu útlumu – po shlédnutí hodnot po 7 dnech zatížení vodní lázni.

Tabulka 1.4: *Porovnání naměřených hodnot před a po zátěži vodní lázni o teplotě 55°C*

LED dioda	Měrný útlum [dB/cm]									
	Nezatěžované vlákno	10 minut	20 minut	30 minut	60 minut	240 minut	1 den	2 dny	3 dny	7 dní
Červená 624 nm	0,2808	0,2553	0,2392	0,2502	0,2687	0,2623	0,2833	0,2097	0,1157	0,1844
Oranžová 605 nm	0,2341	0,1406	0,2089	0,2178	0,2309	0,2390	0,2096	0,2557	0,3114	0,4308
Žlutá 590 nm	0,2522	0,1085	0,1432	0,1232	0,1140	0,0924	0,0538	0,0244	0,0130	0,0193
Zelená 525 nm	0,1821	0,0925	0,1106	0,1145	0,0788	0,0685	0,2001	0,1505	0,1900	0,2472
Modrá 470 nm	0,0888	0,1170	0,1116	0,1024	0,1048	0,0983	0,1014	0,1030	0,0626	0,0750
Fialová 430 nm	0,1522	0,1521	0,1832	0,1710	0,1585	0,1652	0,1792	0,1839	0,1799	0,1785

Zatímco v tabulce 1.4 můžeme pozorovat zvýšení útlumu u více vlnových délek, než v tabulce 1.3. obzvláště u oranžové LED diody o vlnové délce 605 nm došlo ke zvýšení útlumu z hodnoty 0,2341 dB/cm na 0,4308 dB/cm. Zatímco u červené a modré LED diody došlo po zátěži ke snížení útlumu v porovnání s vláknem před zátěží.

Závěr

Bakalářská práce se zabývá vlivem molekul vody na útlum optických vláken vyrobených z PDMS – polydimethylsiloxanu.

V teoretickém úvodu této práce jsem se zaměřil na základní pojmy, které úzce souvisí s optoelektronikou např. pojem co je to světlo. Následující kapitola s názvem Optická vlákna, která se snažila přiblížit co je to optické vlákno, jak se optické vlákna dělí a samotnou jejich výrobu. Mezi velmi důležité kapitoly patřila samotná kapitola, která se zabývala metodami měření útlumu a pojmy se kterými pracuji dále v praktické části. V závěrečných částech, které se věnují teorii, je popsán materiál, který byl nezbytný k výrobě vzorků, které jsem dále měřil. Jednalo se o polydimethylsiloxan. V této kapitole jsem se snažil popsat samotný polydimethylsiloxan a vytvrzovací činidlo, se kterým jsem jej používal. Samotné vlastnosti Sylgardu a jeho možné využití.

Po následném prostudování materiálu, se kterým jsem měl pracovat jsem v praktické části začal se samotnou výrobou vzorků z PDMS. Mezi první kroky patřilo namíchání polydimethylsiloxanu s vytvrzovacím činidlem a to v poměru 10:1. Z počátku docházelo k velkému tvoření vzduchových bublin, ale pomocí uchování směsi v lednici po pár hodinách došlo k jejich vymizení. Jako formu jsem použil silikonové trubičky, které se využívají ve zdravotnictví při tracheostomii. Tudiž jsem měl jistotu ohledně kvality, čistoty a teplotuvzdornosti těchto trubiček. Jako nejjednodušší a zároveň nejúčinnější metoda výroby vzorků byla metoda, kdy jsem v prvním kroku zalil spodní část trubice a nechal ji při teplotě 100°C po dobu 70 minut zapéct. Dalším krokem bylo naplnění silikonových trubiček směsí polydimethylsiloxanu a vytvrzovacího činidla. Bohužel se mi opět při naplňování trubiček objevovaly vzduchové bubliny, proto bylo nutné vzorky opět vložit na pár hodin do lednice. Tento proces byl časově velmi náročný, ale výsledný produkt byl v dostatečné kvalitě, abych jej mohl použít při měření. Posledním krokem bylo vyříznutí vlákna PDMS z formy tak, aby nedošlo k jeho poškození. Chtěl bych zdůraznit, že samotné vlákno bylo velmi náchylné na nečistoty a i přes práci v rukavicích došlo k jeho znečištění. Proto bych doporučil provádět výrobu v naprosto sterilním prostředí. Tímto postupem jsem vyrobil 24 vzorků vláken z PDMS.

Dalším krokem bylo sestavení měřicí sestavy, pomocí které jsem mohl provádět měření útlumy. Využil jsem kit od společnosti ThorLabs, který bylo velmi jednoduché sestavit. Pomocí této měřicí soupravy bylo možné pohybovat s měřenými vzorky v různých směrech, což mi pomohlo dosáhnout ideálních podmínek pro měření.

Posledním krokem bylo pomocí LED zdroje záření a jednotlivých vzorků sestavit tabulky naměřených hodnot, které jsem mohl poté aplikovat do grafů. Pro měření jsem využíval 5 mm LED (celkem 6 barev) diod s vyzařovacím úhlem 30°. Diody byly v rozsahu vlnových délek 430 – 624 nm. Každý vzorek byl testován všemi LED diodami 10krát pomocí metody dvou délek. Než jsem vůbec začal se zatěžováním vláken z PDMS vodní lázní, změřil jsem jejich měrné útlumy, aby po následném zatěžování bylo možné výsledné hodnoty porovnat před a po zátěži. Každý vzorek byl zatěžován vodní lázní buď za pokojové teploty nebo při 55°C v celkově 9 časových intervalech. Výsledné naměřené hodnoty výkonu jsem dosadil do vzorce, pomocí kterého jsem mohl dosáhnout výsledků pro měrný útlum [dB/cm]. Nejvyšší útlum při zatěžování vlákna vodní lázní při pokojové teplotě po dobu 7 dní vykazovala vlnová délka 430 nm (fialová LED dioda) a naopak nejnižší útlum vlnová délka 590 nm (žlutá LED dioda). Zatímco při zatěžování vláken vodní lázní o teplotě 55°C došlo k nárůstu útlumu u tří vlnových délek a to 605 nm (oranžová LED dioda), 525 nm (zelená LED dioda) a 430 nm (fialová LED dioda).

Při výsledném srovnání s hodnotami před a po zatížení vláken z PDMS lze pozorovat minimální změny útlumů tudiž minimálního vlivu vody na vlákno z PDMS. Přičemž k nejvyšší změně došlou vlnové délky 605 nm (oranžová LED dioda) při týdenním zatížení vodní lázní se zvýšenou teplotou 55°C kdy se hodnota měrného útlumu 0,2341 dB/cm změnila na 0,4308 dB/cm.

Určitě je možné dosáhnout lepších výsledků měření, jelikož metoda výroby nebyla dokonalá a nejednalo se o úplně sterilní prostředí.

Použitá literatura

- [1] VAŠINEK, Vladimír. Optoelektronika. 1. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1990. ISBN 80-74078-054-1.
- [2] SKAPA, Jan. Přenosové systémy a média pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3564-8.
- [3] KUCHARSKI, Maciej a Pavel DUBSKÝ. Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras. [2. přeprac. a rozš. vyd.]. Praha: Mikrokom, 1998.
- [4] MARŠÁLEK, Leoš. Optická vlákna. [online] Ostrava: FEI KEST Technická univerzita Ostrava, 2006. [cit.21.3. 2017] Dostupné z URL: <http://www.goro.czweb.org/download/interest.vlakna.pdf>
- [5] Encyklopedie fyzika: Záření absolutně černého[online]. Jaroslav Reichl, martin Všeticka, 2006 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/719-zareni-absolutne-cerneho-telesa>
- [6] BUBNÍK, Ing. Jiří KLAJBL a Ing. Petr MAZUCH. Optoeletrotechnika. 1. Brno: Code Creator, 2015. ISBN 978-80-88058-20-5.
- [7] Linear Polydimethylsiloxanes [online]. 2. Brusel: ECETOC AISBL, 2011 [cit. 2017-03-25]. ISBN 0773-6339-55. Dostupné z: <http://www.ecetoc.org/wp-content/uploads/2014/08/JACC-055-Linear-Polydimethylsiloxanes-CAS-No.-63148-62-9-Second-Edition.pdf>
- [8] ŠTEGAUER, Radek. Silikony v elektrotechnice. Plzeň, 2012. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/5322/DP%20Silikony%20v%20elektrotechnice%20Radek%20Stegbauer.pdf?sequence=> . Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [9] Elveflow: INTRODUCTION TO POLY-DI-METHYL-SILOXANE (PDMS). Elveflow: INTRODUCTION TO POLY-DI-METHYL-SILOXANE (PDMS) [online]. Francie: ELVESYS – Innovation Center, 2015 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.elveflow.com/microfluidic-tutorials/microfluidic-reviews-and-tutorials/the-poly-di-methyl-siloxane-pdms-and-microfluidics/>
- [10] Optoelektronika. Optice.vsb.cz [online], Ostrava: Petr Šiška [cit.2017-01-23]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/images/optice/predmety/OPTE/skripta%2027.1.201520BETA.pdf>

Seznam příloh

Příloha A: Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorek před zátěží	I
Tabulka A.1: Vláknó před zátěží.....	I
Příloha B: Naměřené a vypočtené hodnoty vlákna zatíženého vodní lázní	II
Tabulka B.1: Zatěžované vlákno po dobu 10 minut	II
Tabulka B.2: Zatěžované vlákno po dobu 20 minut	II
Tabulka B.3: Zatěžované vlákno po dobu 30 minut	III
Tabulka B.4: Zatěžované vlákno po dobu 60 minut	III
Tabulka B.5: Zatěžované vlákno po dobu 240 minut	IV
Tabulka B.6: Zatěžované vlákno po dobu 1 dne	IV
Tabulka B.7: Zatěžované vlákno po dobu 2 dnů.....	V
Tabulka B.8: Zatěžované vlákno po dobu 3 dnů.....	V
Tabulka B.9: Zatěžované vlákno po dobu 7 dní.....	VI
Příloha C: Naměřené a vypočtené hodnoty vlákna zatíženého vodní lázní o teplotě 55°C... ..	VII
Tabulka C.1: Zatěžované vlákno po dobu 10 minut	VII
Tabulka C.2: Zatěžované vlákno po dobu 20 minut	VII
Tabulka C.3: Zatěžované vlákno po dobu 30 minut	VIII
Tabulka C.4: Zatěžované vlákno po dobu 60 minut	VIII
Tabulka C.5: Zatěžované vlákno po dobu 240 minut	IX
Tabulka C.6: Zatěžované vlákno po dobu 1 dne	IX
Tabulka C.7: Zatěžované vlákno po dobu 2 dnů.....	X
Tabulka C.8: Zatěžované vlákno po dobu 3 dnů.....	X
Tabulka C.9: Zatěžované vlákno po dobu 7 dní.....	XI

Příloha A: *Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorek před zátěží*

Tabulka A.1: Vláknó před zátěží

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	5,611	2,388	1,154	2,926	4,853	4,935
2.	5,218	2,621	1,318	2,587	4,643	4,915
3.	5,698	2,463	1,241	2,814	4,293	4,345
4.	5,530	2,233	1,227	2,947	4,178	4,055
5.	5,589	2,346	1,182	2,297	4,332	4,159
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,125	3,991	2,045	4,085	5,454	6,588
2.	10,462	4,259	2,313	4,253	5,112	6,120
3.	10,089	3,974	2,166	4,091	5,352	6,622
4.	10,993	4,392	2,246	4,203	5,673	6,363
5.	11,110	4,045	2,174	4,064	5,769	6,124
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,2808	0,2341	0,2522	0,1821	0,0888	0,1522

Příloha B: *Naměřené a vypočtené hodnoty vlákna zatíženého vodní lázní*

Tabulka B.1: *Zatěžované vlákno po dobu 10 minut*

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	5,875	2,289	1,562	2,731	4,635	4,145
2.	5,573	2,813	1,555	2,475	4,472	4,532
3.	6,213	2,324	1,782	2,207	4,168	4,226
4.	5,475	2,937	1,589	2,478	4,742	4,634
5.	5,456	2,852	1,682	2,632	4,486	4,562
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,041	3,012	1,896	3,795	5,910	6,732
2.	10,415	3,324	1,975	3,789	5,542	6,628
3.	10,235	3,596	1,955	3,982	5,913	6,577
4.	10,761	3,173	1,942	4,012	5,576	6,349
5.	10,396	3,381	2,078	3,746	5,345	6,112
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,2584	0,0960	0,0810	0,1883	0,0993	0,1661

Tabulka B.2: *Zatěžované vlákno po dobu 20 minut*

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	5,399	2,432	1,559	2,550	4,186	3,915
2.	5,412	2,378	1,604	2,535	4,252	3,976
3.	5,394	2,823	1,526	2,468	4,063	4,011
4.	5,607	3,065	1,452	2,653	4,035	3,879
5.	5,556	2,978	1,713	2,574	4,673	4,107
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	9,986	3,742	2,325	3,984	5,989	6,846
2.	9,637	3,639	2,482	3,990	5,906	6,415
3.	9,836	3,195	2,384	4,003	5,815	6,813
4.	10,084	3,519	2,286	3,976	5,936	6,551
5.	9,971	3,438	2,256	3,924	5,945	5,829

Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,2574	0,1078	0,1743	0,1918	0,1446	0,2126
---	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

Tabulka B.3: Zatěžované vlákno po dobu 30 minut

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	7,466	3,036	1,642	2,891	4,508	4,226
2.	7,218	3,248	1,538	2,784	4,311	4,175
3.	7,049	3,273	1,712	2,788	4,108	4,315
4.	7,273	2,983	1,464	2,651	4,835	4,438
5.	7,012	3,112	1,440	2,692	4,918	4,204
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,730	3,661	1,950	3,804	5,404	6,012
2.	10,518	3,584	1,887	3,413	5,287	6,274
3.	10,596	3,701	1,846	4,008	5,376	6,115
4.	10,615	3,712	1,908	3,715	5,437	6,362
5.	10,294	3,735	1,779	3,856	5,198	5,985
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,1657	0,07	0,0798	0,1339	0,0709	0,1582

Tabulka B.4: Zatěžované vlákno po dobu 60 minut

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	7,152	2,978	1,315	2,672	4,243	3,982
2.	7,246	2,894	1,325	2,548	4,497	4,049
3.	7,015	3,046	1,412	2,615	4,148	4,115
4.	6,975	3,157	1,156	2,478	4,249	3,876
5.	7,243	2,916	1,297	2,654	4,487	3,943
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,641	3,492	1,815	3,793	5,174	4,183
2.	10349	3,587	1,641	3,579	5,284	4,284
3.	10,547	3,681	1,746	3,649	5,124	3,982
4.	10,498	3,347	1,821	3,748	5,097	4,169

5.	10,475	3,591	1,673	3,513	5,263	4,037
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,1684	0,0720	0,1260	0,1491	0,0790	0,0147

Tabulka B.5: Zatěžované vlákno po dobu 240 minut

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	7,045	2,814	1,165	2,517	4,078	3,876
2.	7,165	2,765	1,247	2,618	4,136	3,854
3.	7,281	2,713	1,265	2,498	4,349	3,947
4.	6,937	2,828	1,427	2,574	4,219	3,556
5.	7,015	2,794	1,157	2,341	4,165	3,287
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,249	3,327	1,765	3,637	5,297	4,164
2.	10,647	3,364	1,627	3,597	5,154	4,094
3.	10,524	3,268	1,562	3,634	5,234	4,118
4.	10,368	3,197	1,694	3,317	5,167	4,008
5.	10,648	3,254	1,528	3,461	5,136	3,985
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,1700	0,0716	0,1158	0,1480	0,0936	0,0413

Tabulka B.6: Zatěžované vlákno po dobu 1 dne

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	7,012	2,753	1,058	2,489	4,164	3,754
2.	6,984	2,624	1,134	2,367	4,137	3,812
3.	6,991	2,761	1,169	2,451	4,096	3,883
4.	7,164	2,655	1,204	2,316	4,142	3,615
5.	7,163	2,718	1,162	2,348	4,364	3,542
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,438	3,217	1,674	3,564	5,164	4,112
2.	10,567	3,204	1,526	3,429	5,237	3,976
3.	10,473	3,283	1,591	3,515	5,214	3,998

4.	10,461	3,273	1,512	3,483	5,137	3,842
5.	10,512	3,264	1,382	3,348	5,181	4,112
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,1718	0,0799	0,1277	0,1608	0,0936	0,0322

Tabulka B.7: Zatěžované vlákno po dobu 2 dnů

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	6,951	2,674	1,194	2,314	4,213	3,648
2.	6,781	2,415	1,218	2,256	4,048	3,691
3.	7,008	2,793	1,116	2,781	4,997	3,574
4.	6,961	2,682	1,028	2,219	4,817	3,553
5.	6,943	2,741	1,215	2,243	4,167	3,614
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,396	3,174	1,615	3,488	5,107	4,085
2.	10,415	3182	1,623	3,412	5,128	4,167
3.	10,326	3,149	1,584	3,394	5,997	3,993
4.	10,841	3,069	1,527	3,451	5,023	3,804
5.	10,472	3,121	1,612	3,512	5,152	4,215
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,1801	0,0717	0,1397	0,1646	0,0745	0,0495

Tabulka B.8: Zatěžované vlákno po dobu 3 dnů

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	6,948	2,482	1,328	2,227	4,215	3,518
2.	6,843	2,519	1,214	2,184	4,164	3,582
3.	6,948	2,412	1,187	2,267	4,015	3,617
4.	6,876	2,581	1,152	2,218	4,205	3,556
5.	6,817	2,575	1,193	2,197	4,167	3,471
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,251	3,082	1,517	3,301	5,481	4,018
2.	10,373	3,074	1,472	3,214	5,413	3,964

3.	10,415	3,215	1,481	3,359	5,378	3,975
4.	10289	2,946	1,576	3,352	54,02	3,964
5.	10,315	2,872	1,584	3,412	5,394	3,718
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,1760	0,0822	0,0990	0,1760	0,1151	0,0440

Tabulka B.9: Zatěžované vlákno po dobu 7 dní

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	6,825	1,564	1,512	2,188	4,987	3,346
2.	6,637	1,762	1,368	2,325	4,763	3,672
3.	6,476	1,823	1,197	2,406	5,049	3,198
4.	6,974	1,644	1,483	2,446	4,602	3,476
5.	6,322	1,901	1,251	2,475	4,816	3,415
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	9,439	2,340	1,364	3,625	5,782	5,273
2.	9,762	2,295	1,486	3,277	5,551	5,453
3.	9,479	2,176	1,504	3,174	5,372	5,291
4.	9,251	2,573	1,475	3,198	5,406	5,635
5.	9,276	2,247	1,398	3,254	5,175	5,283
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,1524	0,1263	0,0257	0,1448	0,0518	0,1971

Příloha C: *Naměřené a vypočtené hodnoty vlákna zatíženého vodní lázní o teplotě 55°C*

Tabulka C.1: Zatěžované vlákno po dobu 10 minut

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	6,012	2,186	1,421	3,272	4,788	4,756
2.	5,947	2,351	1,327	3,127	4,512	4,657
3.	5,961	2,217	1,391	3,014	4,671	4,614
4.	5,982	2,459	1,418	2,994	4,439	4,719
5.	6,001	2,512	1,526	3,184	4,517	4,528
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,930	3,124	1,864	3,947	5,974	6,827
2.	10,918	3,415	1,917	3,826	6,018	6,795
3.	10,482	3,257	1,759	3,967	5,991	6,642
4.	10,749	3,194	1,574	4,064	6,112	6,312
5.	10,758	3,218	1,981	3,983	5,924	6,459
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,2553	0,1406	0,1085	0,0925	0,1170	0,1521

Tabulka C.2: Zatěžované vlákno po dobu 20 minut

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	5,982	2,319	1,382	3,115	4,695	4,518
2.	5,997	2,229	1,391	3,219	4,573	4,526
3.	6,028	2,364	1,394	3,172	4,619	4,378
4.	5,917	2,457	1,362	2,967	4,751	4,167
5.	5,934	2,318	1,287	2,998	4,595	4,291
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,487	3,876	1,972	4,072	5,974	6,675
2.	10,329	3,764	1,847	3,942	5,916	6,722
3.	10,274	3,914	1,943	3,815	6,139	6,614
4.	10,415	3,625	1,835	3,997	6,082	6,735
5.	10,294	3,728	1,882	4,134	5,936	6,619

Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,2392	0,2089	0,1432	0,1106	0,1116	0,1832
---	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

Tabulka C.3: Zatěžované vlákno po dobu 30 minut

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	5828	2241	1267	3094	4625	4328
2.	5793	2267	1316	3118	4596	4476
3.	5754	2186	1257	3027	4618	4451
4.	5816	2197	1268	2997	4620	4362
5.	5825	2264	1354	3115	4588	4245
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10393	3731	1732	3975	5873	6542
2.	10183	3693	1784	3873	5892	6323
3.	10415	3669	1692	4028	5776	6425
4.	10231	3715	1633	4127	5816	6526
5.	10409	3612	1741	3981	5824	6596
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,2502	0,2178	0,1232	0,1145	0,1024	0,1710

Tabulka C.4: Zatěžované vlákno po dobu 60 minut

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	5,673	2,196	1,185	3,001	4,527	4,458
2.	5,614	2,047	1,254	2,983	4,493	4,512
3.	5,559	2,165	1,315	3,942	4,516	4,473
4.	5,482	2,188	1,118	2,871	4,501	4,395
5.	5,475	2,064	1,267	2,917	4,483	4,312
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,341	3,624	1,562	3,852	5,762	6,487
2.	10,296	3,683	1,671	3,491	5,714	6,412
3.	10,225	3,634	1,542	3,754	5,728	6,375
4.	10,362	3,592	1,595	3,865	5,702	6,284

5.	10,394	3,612	1,612	3,882	5,766	6,354
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,2687	0,2309	0,1140	0,0788	0,1048	0,1585

Tabulka C.5: Zatěžované vlákno po dobu 240 minut

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	5,572	2,075	1,272	3,527	4,482	4,378
2.	5,684	2,112	1,231	2,964	4,554	4,426
3.	5,593	2,003	1,194	3,105	4,367	4,391
4.	5,618	2,153	1,207	3,216	4,591	4,355
5.	5,534	1,996	1,215	3,172	4,493	4,419
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,315	3,591	1,519	3,619	5,614	6,481
2.	10,249	3,616	1,472	3,754	5,709	6,328
3.	10,264	3,517	1,496	3,795	5,693	6,485
4.	10,159	3,574	1,527	3,802	5,668	6,512
5.	10,248	3,629	1,556	3,746	5,519	6,337
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,2623	0,2390	0,0924	0,0685	0,0983	0,1652

Tabulka C.6: Zatěžované vlákno po dobu 1 dne

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	5,483	20,12	1,318	2,514	4,315	4,278
2.	5,264	1,996	1,279	2,274	4,296	4,312
3.	5,356	2,148	1,255	2,659	4,278	4,176
4.	5,417	2,197	1,183	2,987	4,384	4,052
5.	5,348	2,202	1,195	3,156	4,352	4,173
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,436	3,436	1,466	3,614	5,436	6,364
2.	10,341	3,597	1,432	3,593	5,472	6,328
3.	10,293	3,428	1,396	3,418	5,516	6,483

4.	10,376	3,449	1,352	5,248	5,531	6,127
5.	10,145	3,195	1,406	5,672	5,361	6,415
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,2833	0,2096	0,0538	0,2001	0,1014	0,1792

Tabulka C.7: Zatěžované vlákno po dobu 2 dnů

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	5,376	1,948	1,276	2,476	4,176	4,176
2.	5,364	1,863	1,224	2,492	4,195	4,125
3.	5,208	1,945	1,176	2,517	4,208	4,082
4.	5,112	1,571	1,381	2,463	4,143	4,163
5.	5,365	1,845	1,449	2,498	4,188	4,002
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,324	3,336	1,346	3,549	5,526	6,275
2.	10,376	3,284	1,379	3,482	5,173	6,294
3.	10,229	3,395	1,317	3,441	5,114	6,305
4.	10,415	3,319	1,448	3,518	5,282	6,214
5.	10,324	3,195	1,393	3,614	5,413	6,296
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,2097	0,2557	0,0244	0,1505	0,1030	0,1839

Tabulka C.8: Zatěžované vlákno po dobu 3 dnů

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	7,847	1,374	1,383	2,144	4,581	4,236
2.	7,976	1,436	1,276	2,172	4,692	4,141
3.	7,573	1,986	1,217	2,203	4,472	4,103
4.	7,892	1,524	1,481	2,322	4,572	3,929
5.	7,917	1,613	1,351	2,331	4,826	4,007
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	10,195	3,217	1,314	3,446	5,324	6,164
2.	10,227	3,248	1,449	3,495	5,376	6,201

3.	10,349	3,265	1,236	3,518	5,415	6,263
4.	10,217	3,309	1,517	3,406	5,331	6,148
5.	10,194	3,214	1,396	3,441	5291	6,119
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,1157	0,3114	0,0130	0,1900	0,0626	0,1799

Tabulka C.9: Zatěžované vlákno po dobu 7 dní

	Nezkrácené vlákno - 10 cm					
	LED dioda a výkon [mW]					
Číslo měření	Červená 624 nm	Oranžová 605 nm	Žlutá 590 nm	Zelená 525 nm	Modrá 470 nm	Fialová 430 nm
1.	6,159	1,181	1,285	1,895	4,286	3,986
2.	6,245	1,012	1,264	1,886	4,205	3,875
3.	6,348	1,174	1,186	1,814	4,195	3,951
4.	6,115	1,096	1,249	1,502	4,186	4,078
5.	6,237	1,004	1,132	1,875	4,204	3,904
	Zkrácené vlákno - 1 cm					
1.	9,634	2,946	1,104	3,105	4,984	5,917
2.	9,314	2,917	1,158	3,198	5,134	6,034
3.	9,485	2,993	1,647	3,267	5,002	6,122
4.	9,534	3,019	1,237	3,114	4,943	5,873
5.	9,591	2,867	1,294	3,169	4,991	5,914
Výsledný měrný útlum [dB/cm]	0,1844	0,4308	0,0193	0,2472	0,0750	0,1785